

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra výrobních strojů a konstruování

**Využití provozních tvarů kmitů (PTK) v
diagnostice**

*The Using of the Operation Defection Shapes in
the Diagnostics*

Student:

Bc. Ondřej Obdržálek

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. František Helebrant, Csc.

Ostrava 2009

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 - školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB -TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB -TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB -TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o VŠ a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě.....

.....
podpis studenta

Adresa trvalého pobytu diplomanta:

Bc. Ondřej Obdržálek

Havlíčková 19, Hodonín 1, 695 01

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. OBDRŽÁLEK, O. **Využití provozních tvarů kmitů (PTK) v diagnostice.**
Ostrava: katedra výrobních strojů a konstruování, Fakulta strojní VŠB –
Technická univerzita Ostrava, 2009, 74 s. Vedoucí: Helebrant, F.

Diplomová práce se zabývá využitím provozních tvarů kmitů v technické diagnostice. V první části diplomové práce je popsána problematika vzniku vibrací u rotačních strojů a její možné příčiny. Dále jsou zde také popsány běžně používané typy snímačů, druhy výstupních signálů a některé metody vibrační diagnostiky.

Druhá část diplomové práce je věnována metodě zviditelnění provozních tvarů kmitu, jejím základům a metodice. Následně je aplikovaná na konkrétní objekty. S pomocí přístrojové techniky jsou získány hodnoty vibrací na určených místech stroje, a na základě měření jsou provedeny animace a vyhodnocení provozních měření.

ANNOTATION THESIS

Bc. OBDRŽÁLEK, O. **The Using of the Operation Defection Shapes in the Diagnostics.** Ostrava: department of production machinery and design, Faculty of Mechanical Engineering VŠB – Technical University of Ostrava, 2009, 74 p. Supervisor: Helebrant, F.

Thesis deals with the use of the operation defection shapes in technical diagnostics. In the first part of thesis is describes the issues of establishment of vibration in rotating machinery and their possible causes. In addition, there are also described in commonly used types of sensors, types of output signals and a method of vibration diagnostics.

The second part of thesis is devoted to the method visibility of the operation defection shapes, their basic and methodology. It is applied to concrete objects. With the help of instrumentation are the vibration data obtained at the points of machines, on the measurements are made animations and evaluation of operating measurement.

OBSAH

POUŽITÉ ZNAČENÍ A ZKRATKY	9
1 ÚVOD	11
2 VIBRODIAGNOSTIKA	12
2.1 MECHANICKÉ KMITÁNÍ	12
2.2 VIBRACE ROTAČNÍCH STROJŮ	13
2.3 PŘÍČINY VZNIKU VIBRACÍ U ROTAČNÍCH STROJŮ	14
2.3.1 NEVYVÁŽENOST	14
2.3.2 NESOUOSOST	17
2.3.3 MECHANICKÉ UVOLNĚNÍ	19
2.4 HLAVNÍ PARAMETRY	21
2.5 SNÍMAČE VIBRACÍ	23
2.5.1 TYPY SNÍMAČŮ	23
2.5.2 UPEVNĚNÍ KONTAKTNÍCH SNÍMAČŮ	26
2.5.3 MONTÁŽ BEZDOTYKOVÉ SONDY	28
2.6 KLASIFIKACE SIGNÁLŮ	30
2.7 ZÁKLADNÍ METODY VIBRAČNÍ DIAGNOSTIKY	31
3 METODA ZVIDITELNĚNÍ PROVOZNÍCH TVARŮ KMITU	36
3.1 ZÁKLADNÍ POJMY A DEFINICE	37
3.2 MODÁLNÍ ROZKLAD	37
3.3 ROZKLAD POMOCÍ PROVOZNÍCH TVARŮ KMITU	39
3.4 VLASTNÍ A PROVOZNÍ TVARY KMITU	39
3.5 MĚŘENÍ PROVOZNÍCH TVARŮ KMITU	40
3.5.1 SYSTÉMOVÝ PŘÍSTUP	40
3.5.2 SIGNÁLOVÝ PŘÍSTUP	40
3.5.3 TRANSMISSIBILITA	41
3.5.4 KOHERENCE	42
3.6 METODIKA NASAZENÍ PTK	42
3.7 ZJEDNODUŠENÝ POSTUP NASAZENÍ PTK	45

4 PTK TURBOGENERÁTORU – MECHANICKÉ UVOLNĚNÍ	46
4.1. POUŽITÉ VYBAVENÍ A NASTAVENÍ MĚŘENÍ	46
4.2 VOLBA MĚŘENÝCH BODŮ.....	47
4.3 GEOMETRICKÝ MODEL	49
4.4 VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	50
5 PTK TURBÍNY – APLIKACE NA OSU ROTOROVÉ SOUSTAVY	
.....	52
5.1 POUŽITÉ VYBAVENÍ	52
5.2 VOLBA PARAMETRŮ PRO ANALÝZU PTK	55
5.2.1 GEOMETRICKÝ MODEL.....	55
5.2.2 VOLBA STUPŇŮ VOLNOSTI	55
5.2.3 VOLBA (ZJIŠTĚNÍ) DOMINANTNÍ FREKVENCE.....	56
5.2.4 ODEČET AMPLITUDY A FÁZE	57
5.3 ZPRACOVÁNÍ PTK PRO JEDNOTLIVÉ REŽIMY	59
5.3.1 SOUSTAVA V REŽIMU 0 MW (NAPRÁZDNO)	59
5.3.2 SOUSTAVA V REŽIMU 110 MW	60
5.3.3 SOUSTAVA V REŽIMU 200 MW	61
5.4 VYHODNOCENÍ ANALÝZY	62
5.5 VÝSLEDKY ANALÝZY	63
6 ZÁVĚR	64
POUŽITÁ LITERATURA	65
PŘÍLOHY	67

POUŽITÉ ZNAČENÍ A ZKRATKY

Značka	Název	Rozměr
BCU	metoda nepřímého měření rázových impulsů	-
F	síla od nevývažku	[N]
F_1	síla od velkého nevývažku	[N]
F_2	síla od malého nevývažku	[N]
FFT	rychlá Fourierova transformace	-
GEN	generátor	-
HFD	vysokofrekvenční detekce	-
NT	nízkotlaký díl turbíny	-
PTK	provozní tvar kmitu	-
RMS	efektivní hodnota	-
SEE	spektrální emitovaná energie	-
SPM	metoda přímého měření rázových impulsů	-
ST	středotlaký díl turbíny	-
T	doba jednoho kmitu	[s]
$T_{ij}(f)$	transmissibilita	-
VT	vysokotlaký díl turbíny	-
a	amplituda zrychlení	$[m \cdot s^{-2}]$
dt	diferenciál času	-
dv	diferenciál rychlosti	-
f	frekvence	[Hz]
$q_r(t)$	modální odezva	-
$r(t)$	reziduální vektor	-
t	čas	[s]
v	rychlost	$[mm \cdot s^{-1}]$
x	výchylka v libovolné souřadnici	-
$x(t)$	tvar vynucené průhybovky	-
$x(\xi, t)$	spojitá funkce vynucené výchylky	-
y	výchylka	$[\mu m]$
$y_{Average}$	průměrná hodnota sinusových kmitů	-

<u>Značka</u>	<u>Název</u>	<u>Rozměr</u>
y_{RMS}	efektivní hodnota sinusových kmitů	-
$\{\Phi\}_r$	vlastní tvar kmitu	-
$\gamma_{ij}(f)$	koherence	-
π	Ludolfovo číslo	-
ω	kruhová frekvence	$[\text{s}^{-1}]$
ξ	veličina polohy	-

1 ÚVOD

V současné době je stále více využíváno, dříve opomíjených metod technické diagnostiky, které patří k nejdůležitějším prostředkům zajištění údržby. Jednou z velmi důležitých disciplín technické diagnostiky je vibrodiagnostika. Vibrodiagnostika náleží do skupiny bezdemontážních metod diagnostiky a slouží k určování okamžitého stavu strojů.

Vibrační diagnostika patří mezi jeden z nejvýznamnějších nástrojů zajišťování spolehlivého chodu rotačních strojů. Správnou aplikací detekčních postupů je možné většinu vznikajících závad odhalit s dostatečným předstihem tak, že je možné naplánovat a provést opravy s minimálními náklady a ztrátami ve výrobě.

Jednou z nejběžnějších metod sledování vibrací je měření celkových vibrací stroje. Pro zvýšení efektivnosti metody, která je založena na sledování celkových hodnot, se často kombinuje s vyhodnocováním trendu ve sledovaném časovém úseku, umožňuje tedy zachytit poslední fázi rozvoje závady.

Nejdůležitější metodou vibrační diagnostiky, užívanou při sledování strojů, zaměřenou na spolehlivost provozu, je metoda detekce změny vibračního signálu při jinak stejných podmínkách chodu stroje. Tato metoda je u důležitých strojů aplikována použitím přímospřažených (on-line) systémů. U běžných strojů se aplikuje na bázi periodického sledování stavu. Pomocí detekce změny signálu odlišíme nevýznamné a významné změny ve spektrech, podle kterých se určuje další analýza problému. Jedná se o časově dosti náročný krok, zejména pro velký počet pravidelných měření. Běžně se proto používají speciální diagnostické programy, které umožňují srovnání spekter stroje v průběhu jeho provozu.

2 VIBRODIAGNOSTIKA

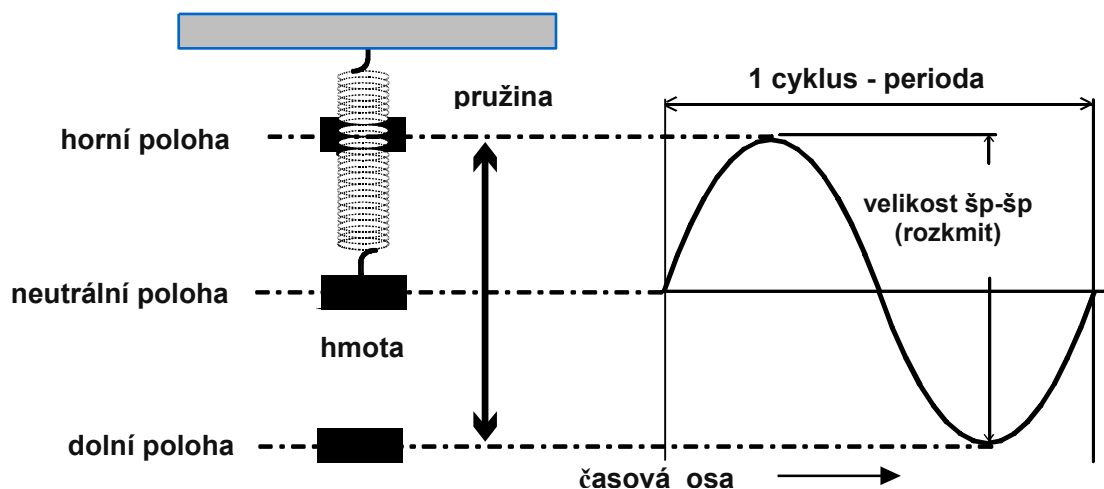
Vibrační diagnostika [1] využívá jako diagnostického parametru vibrace, které jsou zapříčiněny dynamickým namáháním stroje, a díky tomuto parametru určujeme technický stav rotujících strojů.

Základním cílem sledování vibrací rotačních strojů [8] je poskytnutí informací o provozním a technickém stavu zařízení za účelem zabezpečení strategického plánování a řízení údržby. Nedílnou součástí se tak stává především hodnocení stavu a průběhu vibrací za dobu dosavadního provozu.

Je nutno si uvědomit, že vibrace u rotujících strojů jsou úzce vázány na dynamické namáhání stroje, souvisí se stavem ložisek, převodovek, nevyvážeností, nesouosostí, trhlinami v důležitých komponentech, opotřebování apod., takže jejich monitorování a vyhodnocení patří k základním a rozhodujícím metodám technické diagnostiky.

2.1 MECHANICKÉ KMITÁNÍ

Mechanické kmitání [13] je pohyb pevných těles kolem určité, zpravidla rovnovážné polohy. Kmitání lze vysvětlit jako pohyb tělesa zavěšeného na pružině, které je znázorněno na obr. 1.



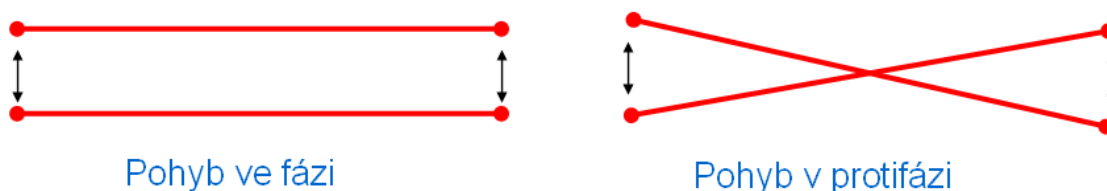
Obr. 1 Kmitavý pohyb

Pohyb bodu je způsoben pružnou silou pružiny, která se ji snaží vrátit do její původní polohy. Vychýlením hmotného bodu z neutrální polohy do dolní polohy, se bude hmotný bod pohybovat pohybem zrychleným vlivem pružné síly do neutrální polohy. Následně vlivem setrvačné síly dojde ke stlačení pružiny až do horní polohy, pak vlivem tlačné síly pružiny se hmotný bod pohybuje zpět do neutrální polohy. Tím dostáváme periodický pohyb kmitavý kolem rovnovážné neutrální polohy se stejnou frekvencí a amplitudou.

2.2 VIBRACE ROTAČNÍCH STROJŮ

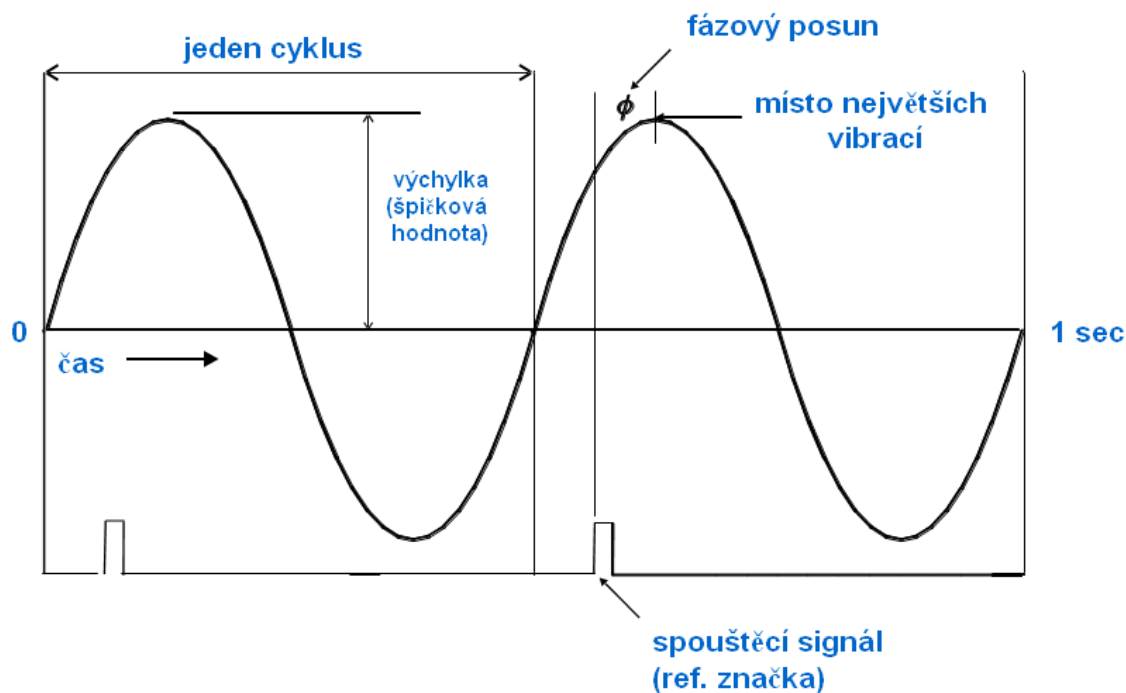
Provoz všech rotačních strojů je vždy doprovázen mechanickým kmitáním. Vyhnout se kmitání je za provozu téměř nemožné. Příčinami mechanického kmitání jsou dynamické síly, které vznikají výrobní nepřesností, vůlí pohybových součástí, stykem mechanických prvků při tření nebo odvalování. Kmitání může vyvolat rezonanci dalších součástí stroje a tím vyvolat další vibrace.

Vedle mechanického kmitání [14], které popisujeme pomocí frekvencí a amplitud na těchto frekvencích (v daném měřeném bodě) nás zajímá další velmi významná veličina, která se používá zejména při detailní analýze a je jí fáze. Umožňuje posuzovat vzájemný pohyb bodů vůči sobě v čase, nebo ve vztahu k fázové referenci (např. ke značce na rotujícím hřídeli). Nejjednodušší příklady vzájemného pohybu jsou na obrázku 2.



Obr. 2 Vzájemný pohyb bodů

Aby bylo možné posoudit vzájemný pohyb bodů vůči sobě je nejvhodnější přidat referenční značku (Obr. 3), vůči které se bude údaj o fázovém posunu vztahovat (stejná značka pro všechny měřené body).



Obr. 3 Znázornění fáze na časové vlně

2.3 PŘÍČINY VZNIKU VIBRACÍ U ROTAČNÍCH STROJŮ

2.3.1 NEVYVÁŽENOST

Nevyváženost [1] nastává, když centrální osa setrvačnosti není totožná s osou rotace. Výzkumy prokazují, že největší část problémů se zvýšenými vibracemi strojů je tvořena právě nevyvážeností. Rozeznáváme tři základní druhy nevyváženosti:

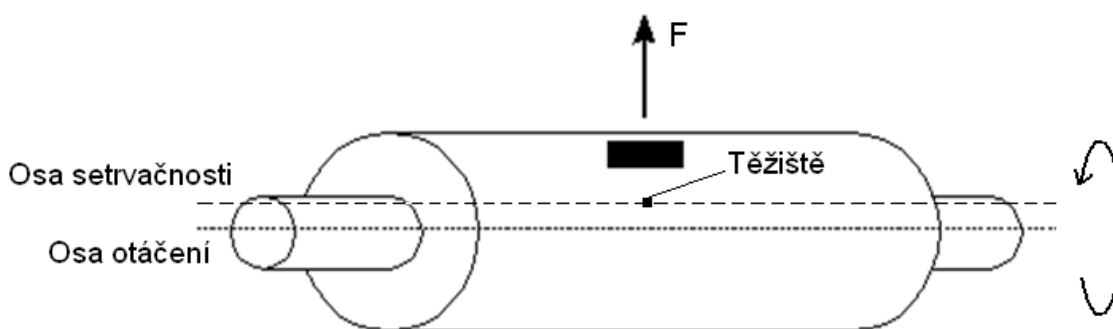
- statická
- momentová
- dynamická

Při vyvažování řešíme dvě úlohy:

- měření nevývažku (poloha)
- kompenzace nevývažku (hmotnost)

1 STATICKÁ NEVYVÁŽENOST

Jedná se o paralelní posunutí hlavní osy setrvačnosti vůči ose otáčení (Obr. 4), jejich vzdálenost odpovídá posunutí těžiště rotoru. Působí zde jedna síla, kterou je možné pozorovat položením rotoru na rovnou plochu, a rotor se otočí. Vyvažování se provádí v jedné vyvažovací rovině.



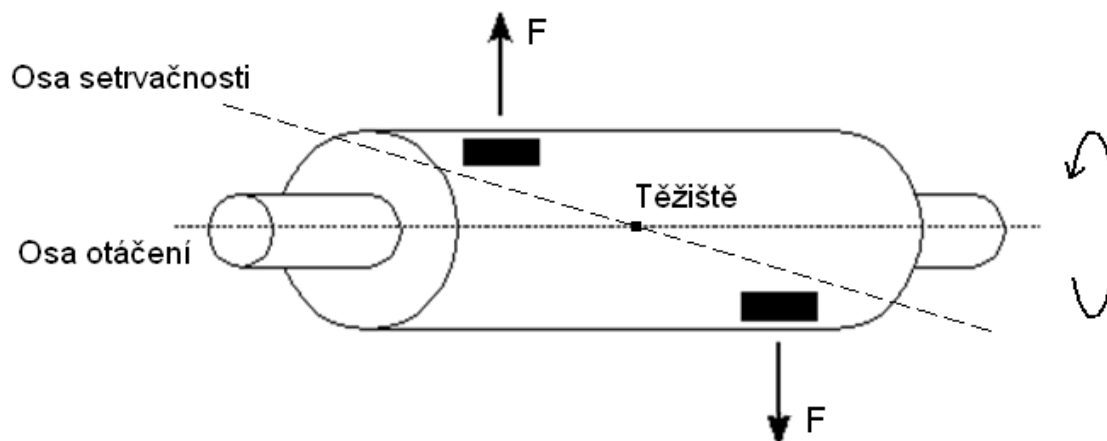
Obr. 4 Statická nevyváženost

Statická nevyváženost je ve fázi a je stacionární. Amplituda nevyváženosti zvětšuje s kvadrátem otáček ($3x$ větší otáčky $\Rightarrow 9x$ větší vibrace). První harmonická složka otáček je vždy přítomna a většinou ve spektru dominuje (Obr. 6).

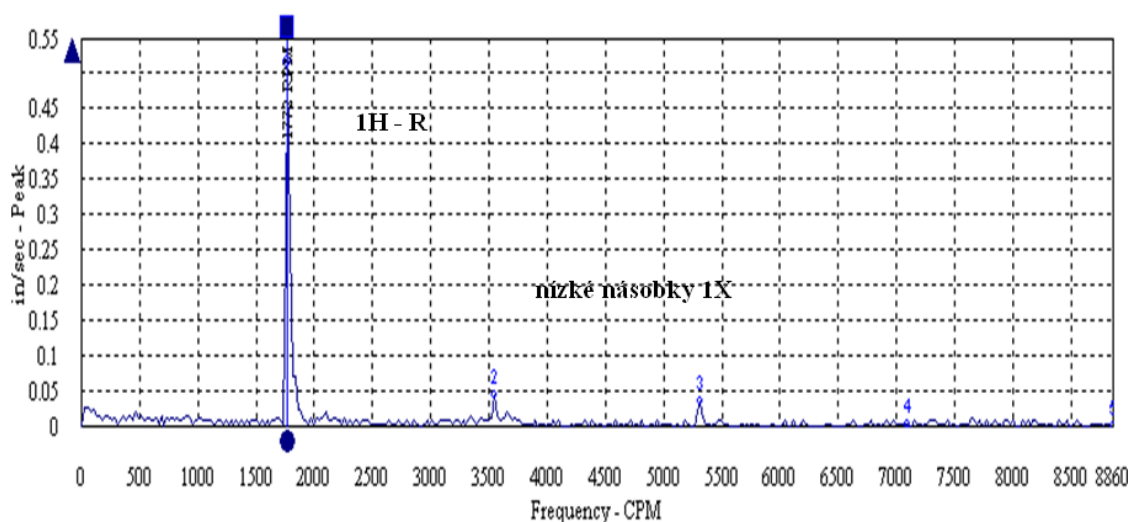
2 MOMENTOVÁ NEVYVÁŽENOST

Hlavní osa setrvačnosti svírá s osou otáčení určitý úhel (Obr. 5). Na rozdíl od statické, nelze momentovou nevyváženost měřit v klidu. Působí zde dvě totožné síly proti sobě, což způsobuje, že v klidové poloze se rotor jeví jako vyvážený. Při otáčení se ovšem tyto síly posunují na obou koncích hřídele v opačném směru, následkem toho rotor vibruje.

Momentová nevyváženost má tendenci k posunu fáze o 180° na stejném hřídeli. První harmonická složka je vždy přítomna a většinou ve spektru dominuje (Obr. 6). Amplituda se mění s kvadrátem otáček.



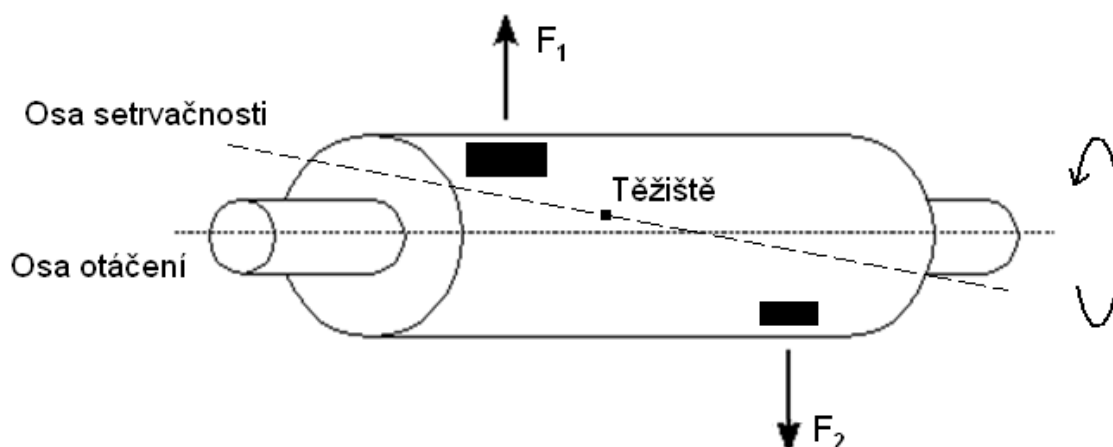
Obr. 5 Momentová nevyváženost



Obr. 6 Charakteristické spektrum statické a momentové nevyváženosti

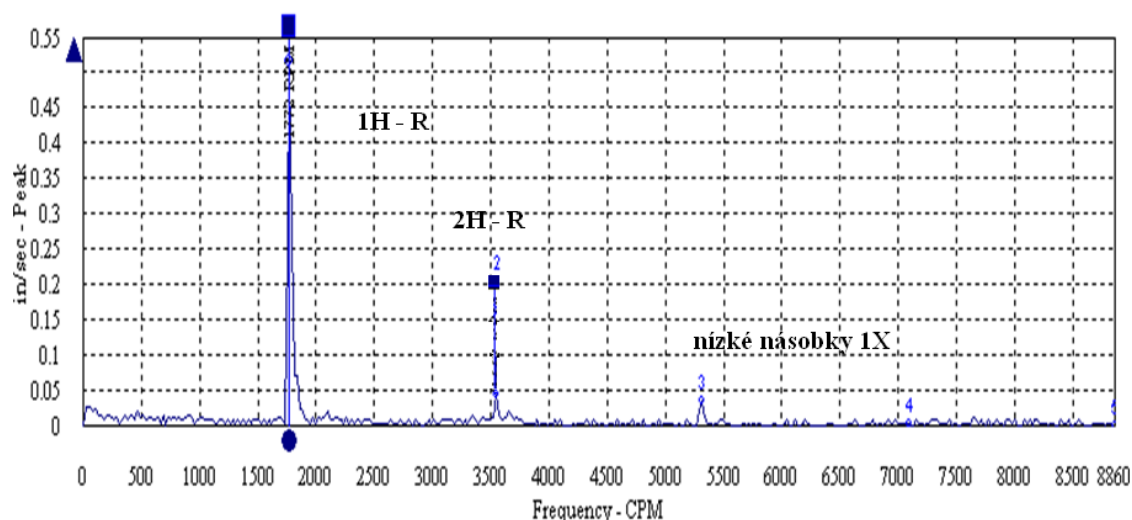
3 DYNAMICKÁ NEVYVÁŽENOST

Hlavní osa setrvačnosti neprotíná osu otáčení v těžišti, ale mimo něj (Obr. 7). U většiny případů dynamické nevyváženosti v praxi se jedná o kombinaci statické a momentové nevyváženosti. Při vyvažování stroje se nejdříve vyvažuje statická, a pak dynamická nevyváženost. Vyvažování se provádí v několika rovinách.



Obr. 7 Dynamická nevyváženost

Dominuje zde amplituda otáčkové frekvence rotoru. Fázový rozdíl je obecný. Větší nevyváženost může způsobit nelinearitu a výskyt amplitudy s 2x frekvenci otáčkovou (Obr. 8).



Obr. 8 Charakteristické spektrum dynamické nevyváženosti

2.3.2 NESOUOSOST

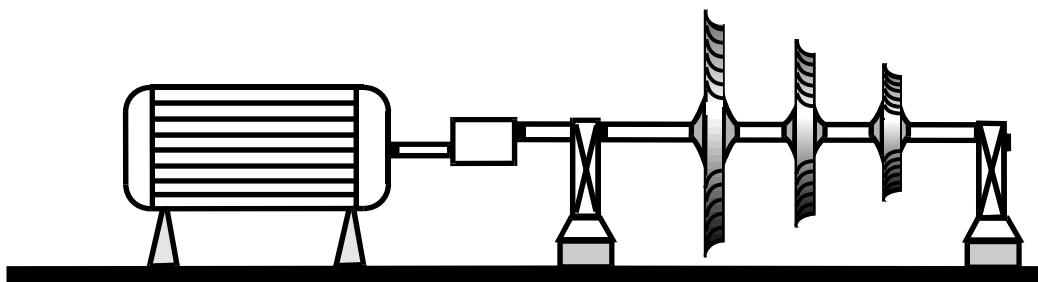
V praxi se z jednotlivých strojů [1] vytvářejí soustrojí, které tvoří např. pohonné jednotky. Spojení hřídelů přes spojky, zajišťuje přenos točivého momentu. Při spojování je nutno dbát na přesnou souosost spojovaných hřídelů. Při nesprávném ustavení vznikají za provozu vynucené síly a kmity,

které vyvolávají přídatné zatížení hřídelů, spojek, ložisek a základů. Základními druhy nesouososti jsou:

- paralelní nesouosost
- úhlová nesouosost

1 PARALELNÍ NESOUOSOST

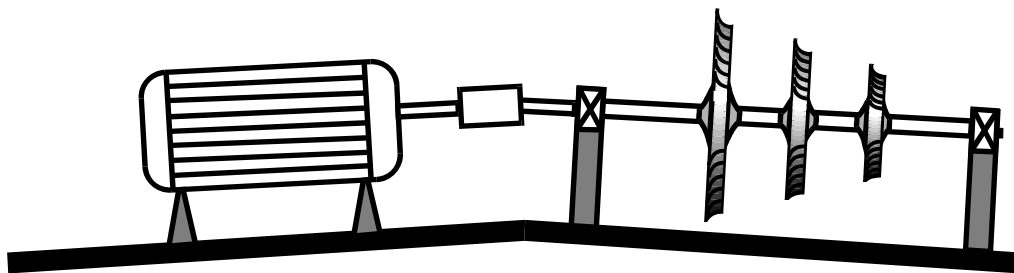
Nastává v případech kdy jsou hřídele vůči sobě posunuty, ale při tom zůstávají rovnoběžné (Obr. 9). Možnými příčinami může být špatné strojní zpracování, nerovné a posouvající se základy, nesprávné ustavení atd. Je provázena velkými radiálními vibracemi u spojky v protifázi, 2x otáčková je mnohdy větší než 1x otáčková. Při velkém přesazení se vytváří amplitudy s 4x až 8x vyšší harmonickou složkou otáčkové frekvence.



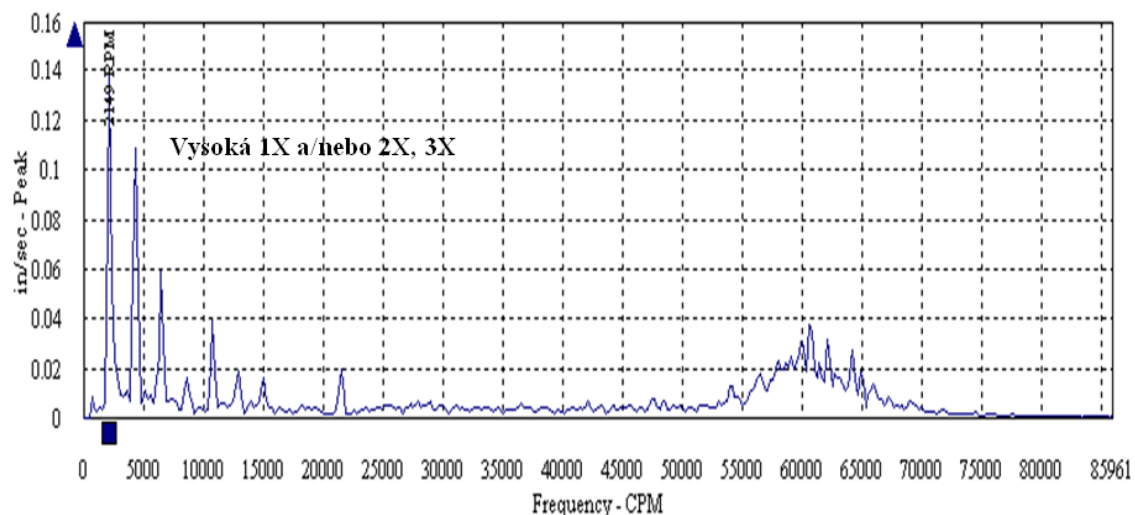
Obr. 9 Paralelní nesouosost

2 ÚHLOVÁ NESOUOSOST

Nastává v případech kdy jsou hřídele spojeny spojkou tak, že vzniká přídatná ohybová síla (Obr. 10). Charakterizují ji velké axiální vibrace. Přes spojku se mění fáze o 180°. Obsahuje výrazně vyšší harmonické složky 1x, 2x nebo i 3x otáčkové frekvence.



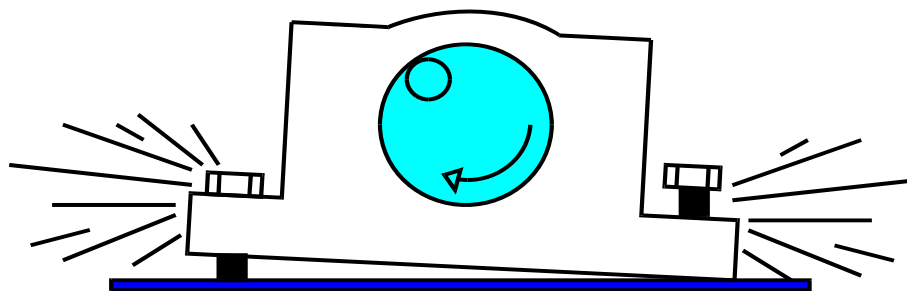
Obr. 10 Úhlová nesouosost



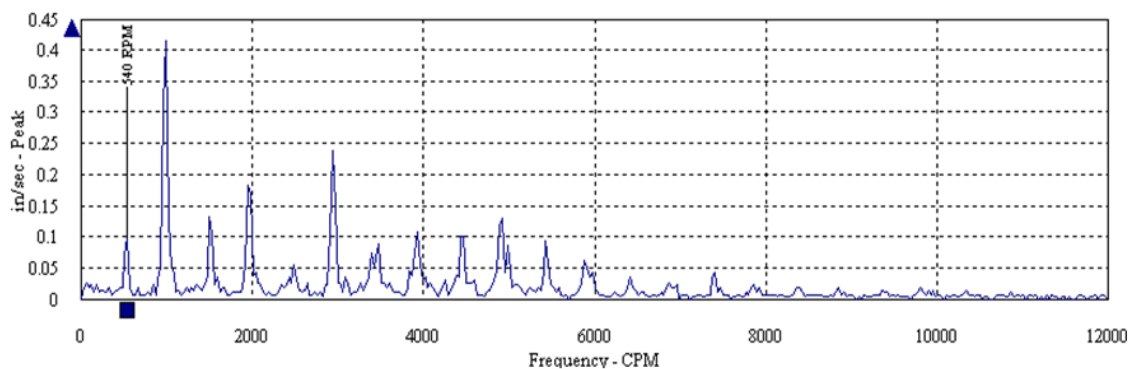
Obr. 11 Charakteristické spektrum nesouososti

2.3.3 MECHANICKÉ UVOLNĚNÍ

Způsobuje jej například nesouosost hnacího a hnaného členu, což zapříčiňuje vibrace a ty postupem času uvolňují kotvení stroje (Obr. 12). Často se také projevuje jako sled neobvykle vysokých amplitud vyšších harmonických složek a otáčkové frekvence subharmonických složek (Obr. 13). Velikosti těchto amplitud by měly být vyšší než 20% hodnoty základní otáčkové frekvence.



Obr. 12 Mechanické uvolnění



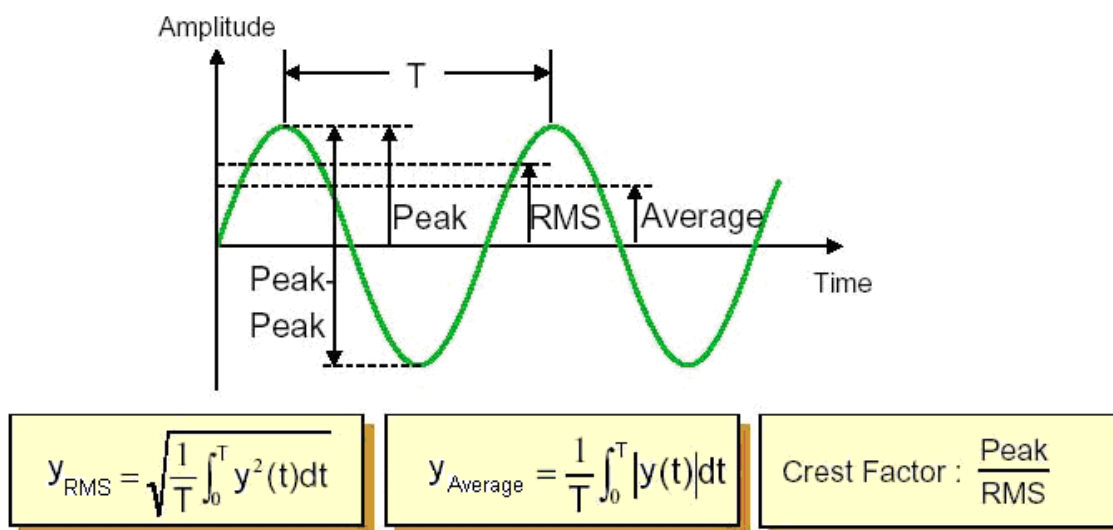
Obr. 13 Charakteristické spektrum při mechanickém uvolnění

Může se také projevit strukturním uvolněním (nebo měkkostí) patek stroje, základového rámu nebo základu. Také zhoršením stavu zálivky, deformací základového rámu nebo základu (Obr 14). Analýza může odhalit fázový rozdíl 90° až 180° mezi vertikálním měřením na šroubu, patce stroje, základové desce nebo samotném základu.



Obr. 14 Strukturní mechanické uvolnění

2.4 HLAVNÍ PARAMETRY



Obr. 15 Efektivní hodnota, průměrná hodnota a činitel výkmitu sinusových kmitů

Mezi nejdůležitější parametry patří následující veličiny:

➤ Výchylka

Je to okamžitá vzdálenost kmitajícího bodu od jeho klidové polohy.

$$y = \frac{a}{4\pi^2 \cdot f^2} = \int v \cdot dt \quad [\text{m}] \quad (1)$$

➤ Rychlost

Jedná se o rychlost, se kterou se mění výchylka.

$$v = \frac{a}{2\pi \cdot f} = \int a \cdot dt \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2)$$

➤ **Zrychlení**

Je to rychlost změny rychlosti v závislosti na čase.

$$a = \omega \cdot v = \omega^2 \cdot y \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (3)$$

➤ **Fáze**

Je úhlová vzdálenost, a spočívá v měření časového vztahu mezi dvěma signály. Jednotkami jsou [rad] nebo [°].

➤ **Frekvence**

Je to počet cyklů kmitavého pohybu za jednu sekundu, značíme ji f , a jednotka je [Hz].

$$f = \frac{1}{T} \quad [\text{Hz}] \quad (4)$$

➤ **Amplituda**

Je to velikost mechanického kmitání.

➤ **Rozkmit (Peak – Peak)**

Označovaný jako hodnota špička - špička, udává největší rozkmit hodnocené vlny (Obr. 15).

➤ **Vrcholová hodnota (Peak)**

Popisuje amplitudy krátkodobých jevů, mechanických rázů apod., ovšem vyznačuje pouze přítomnost špičky (Obr. 15), neodráží časový průběh ani kmitočtové složení hodnocených kmitů.

➤ **Průměrná hodnota (Average)**

Je to průměrná hodnota amplitudy vlny. Vztah pro výpočet je uveden na obr. 15.

➤ **Efektivní hodnota (RMS)**

Je to nejdůležitější veličina ve vztahu k rychlosti, protože odráží časový průběh kmitání a současně má přímou vazbu k jeho energetickému obsahu. Je tedy zároveň měřítkem nebezpečnosti a škodlivosti mechanického kmitání. Vztah pro výpočet je rovněž uveden na obr. 15.

➤ **Harmonická složka signálu**

Tvoří ji harmonický kmit s frekvencí, která je celistvým násobkem základní frekvence.

➤ **Subharmonická složka signálu**

Tvoří ji desetinné násobky základní frekvence.

2.5 SNÍMAČE VIBRACÍ

2.5.1 TYPY SNÍMAČŮ

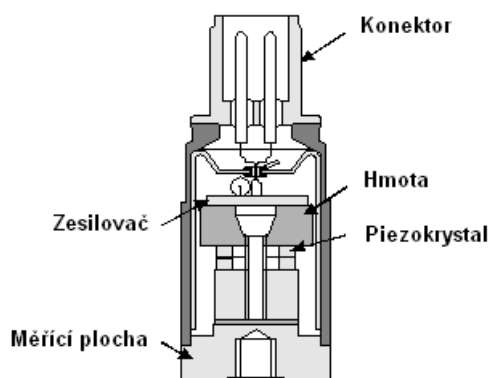
Při měření vibrací [1] by měl výstupní signál co nejpřesněji odpovídat průběhu kmitání, což je relativně obtížný úkol. Podle měřené veličiny provádíme výběr snímačů, které dělíme na:

- snímače zrychlení (akcelerometry)
- snímače rychlosti (velometry)
- snímače výchylky (bezdotykové sondy)

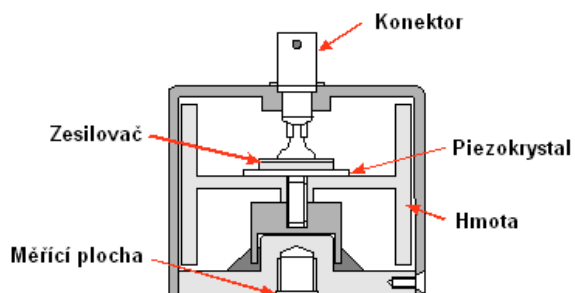
1 AKCELEROMETRY

V dnešní době jsou nejrozšířenějším typem snímačů akcelerometry, protože jejich výstupy mohou být zpracovány tak, aby bylo možné stanovit výchylku, směr rychlosti i zrychlení vibrací, což jsou požadované veličiny. Jsou to seismické zařízení, které generují výstupní signál úměrný mechanickému vibračnímu zrychlení měřeného tělesa. Tento typ je použit při měření v kapitole 4. Typický akcelerometr obsahuje piezoelektrické krystalové elementy, které vytváří elektrický náboj, který je úměrný působící síle. Podle nich rozeznáváme tři druhy akcelerometrů:

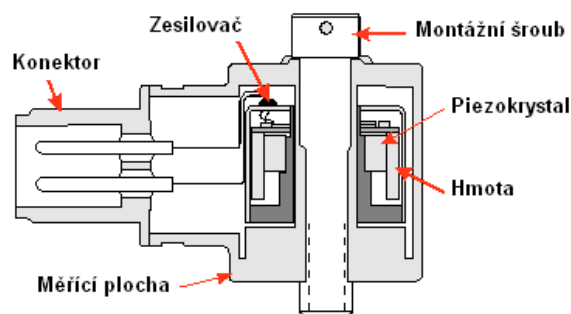
- tlakový (široký rozsah, robustní)
- ohybový (velmi nízké frekvence, křehký)
- smykový (malý vliv teploty základny, nízký profil)



Obr. 16 Tlakový akcelerometr



Obr. 17 Ohybový akcelerometr



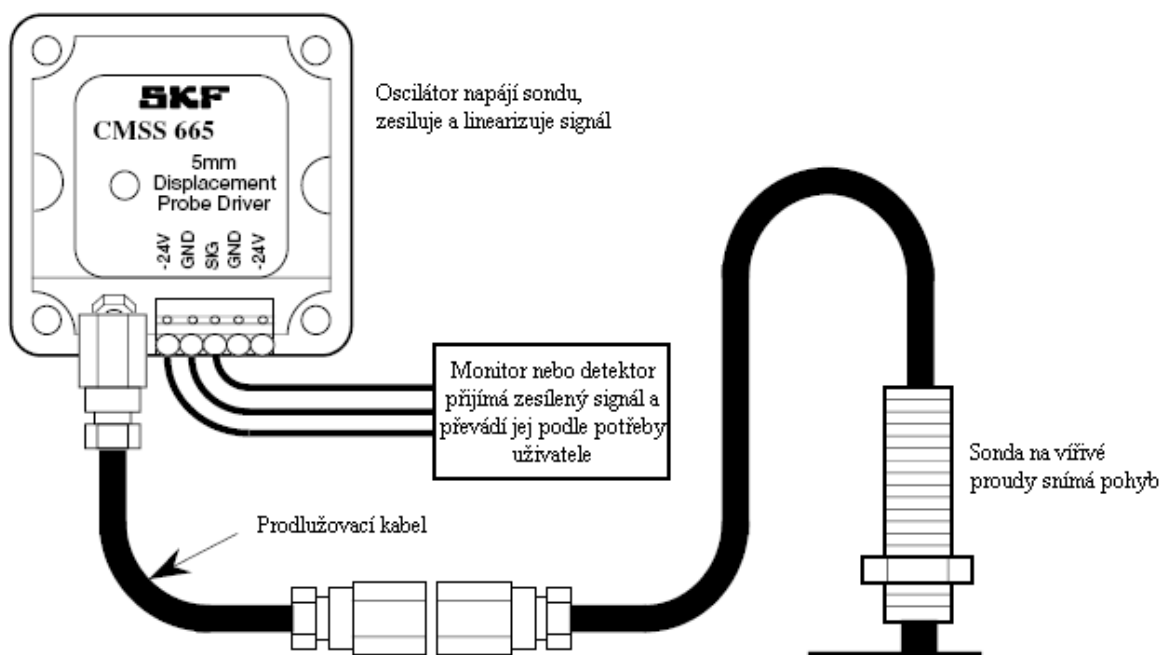
Obr. 18 Smykový akcelerometr

2 VELOMETRY

Snímače rychlosti jsou seismická zařízení, které generují napěťový signál úměrný vibrační rychlosti tělesa. Snímače se většinou aplikují na nerotující konstrukci stroje. Naměřené hodnoty můžeme zpracovat pomocí integrace na výchylku vibrací.

3 BEZDOTYKOVÉ SONDY

Použití u rotačních strojů velkých konstrukcí. Snímač je bezdotykové zařízení, které přímo snímá vibrační výchylku. Výstup měření je přímo úměrný relativní výchylce vibrací mezi rotujícími a nerotujícími komponenty stroje. Systémy se sondami na vířivé proudy (bezdotykové) jsou integrální komponenty a v typickém případě sestávají z bezdotykové sondy, prodlužovacího kabelu a oscilátoru (Obr. 19).



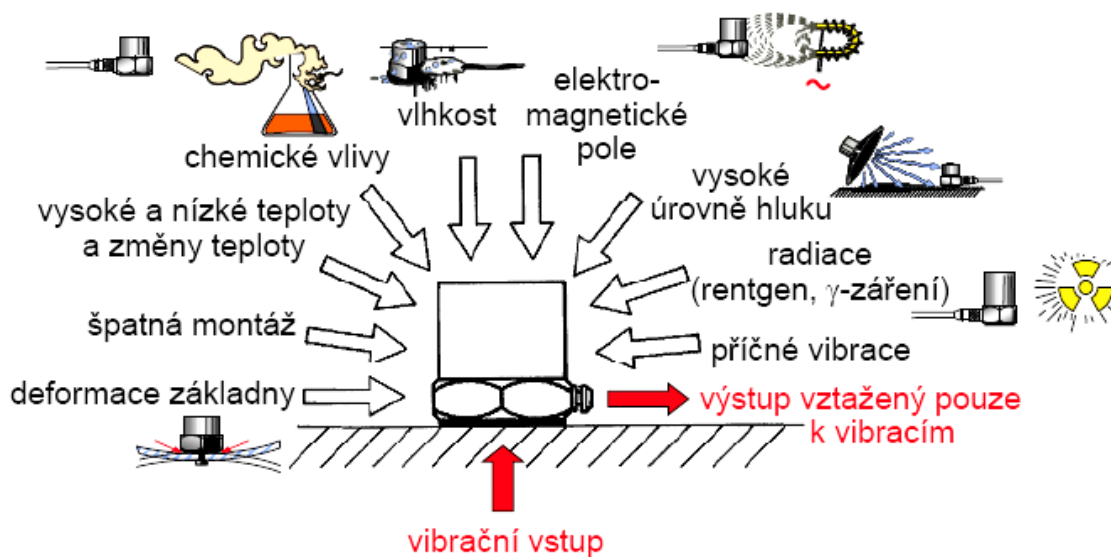
Obr. 19 Systém se sondou na vířivé proudy od SKF Condition Monitoring

Sonda na vířivé proudy snímá okamžitou vzdálenost a převádí tuto vzdálenost na použitelný elektrický signál. Signál pak lze zaslat do monitorovacího systému na úpravu, analýzu nebo pro poplachovou ochranu.

Tento typ je použit v aplikaci na osu rotorové soustavy v kapitole 5.

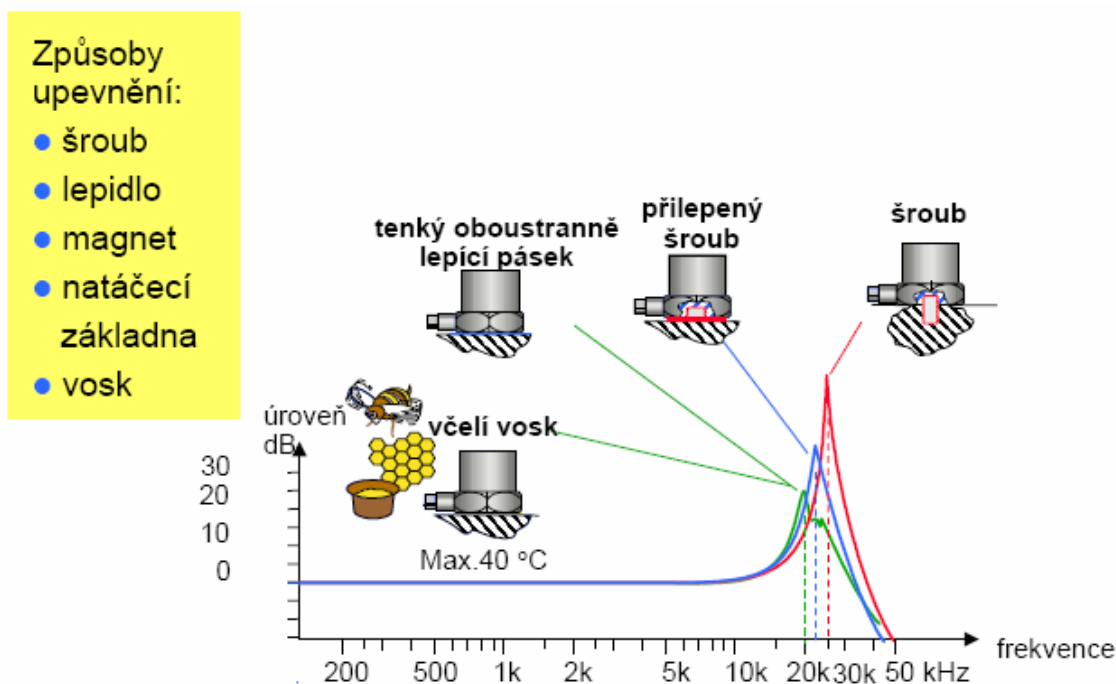
2.5.2 UPEVNĚNÍ KONTAKTNÍCH SNÍMAČŮ

Správné měření vibrací [1] je v rozhodující míře závislé na správném přenosu pohybu na snímače, takže rozhoduje upevnění snímačů. Na upevnění často působí [11] různé vnější vlivy (Obr. 20), které jsou nežádoucí. Proto je vhodné tyto vlivy v co největší míře eliminovat.



Obr. 20 Vnější prostředí při měření

Způsob uchycení (Obr. 21) nejvýrazněji ovlivňuje frekvenční odezvu snímače, záleží na dostupnosti, vhodnosti, ekonomické a technické úvaze. Samotným uchycením se zabývá norma ČSN ISO 5348. Špatná montáž akcelerometru může zkazit vibrační měření tím, že podstatně sníží použitelný frekvenční rozsah. Hlavní požadavek je kladen na co nejdokonalejší mechanický kontakt mezi základnou akcelerometru a povrchem, ke kterému je připevněn.



Obr. 21 Pevné uchycení snímačů

Přípevnění pomocí permanentního magnetu

Jedná se asi o nejpoužívanější formu upevnění [12] snímačů vibrací. Jde o typ snímače, jehož dotyková plocha je tvořena permanentním magnetem (Obr. 22). Toto řešení zásadně usnadňuje manipulaci se snímačem, který stačí pouze přiložit na povrch kovového měřeného objektu a snímač drží sám. Odpadá tedy únavné lepení nebo fixování snímače ostatními způsoby.

Základní nevýhodou je snížení rezonanční frekvence, tedy nemožnost použití tohoto způsobu pro měření signálů s velkou frekvencí (převodovky apod.)



Obr. 22 Snímač s permanentním magnetem a jeho uchycení

Montáž pomocí šroubu

Připevnění akcelerometru pomocí ocelového šroubu [11] je nejlepší způsob připevnění šroubu. Rezonance na vysokých frekvencích může působit chybné signály, a proto musí být výstup z akcelerometru na těchto vysokých frekvencích zeslaben.

Přilepené šrouby

V místech, kde není možné vrtat a vyřezat díry pro šrouby, může být na stroj přilepen šroub pomocí speciálního lepidla. Odezva bude skoro stejně tak dobrá jako při použití samotného šroubu.

Montáž pomocí včelího vosku

Pro rychlé přilepení akcelerometrů, např. při měření vibrací na několika různých místech, může být použit včelí vosk. Jeho použití je omezeno teplotou do 40 °C.

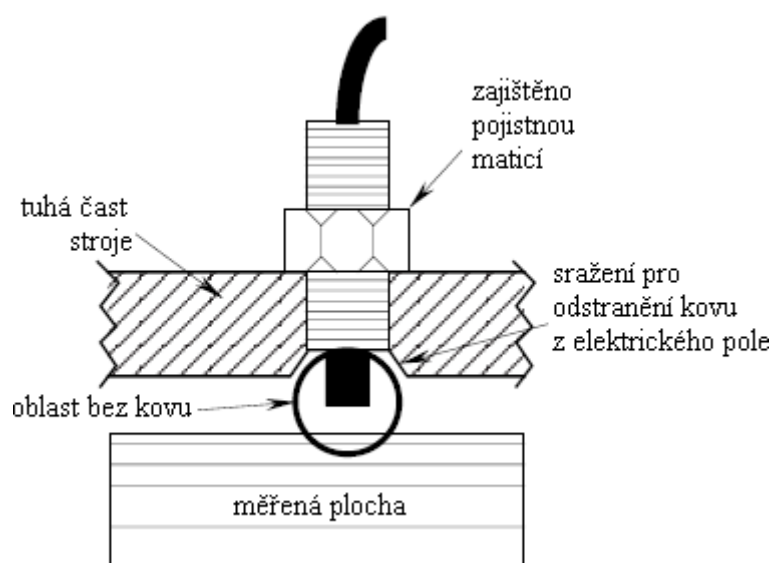
Izolovaná montáž

Na místech, kde je žádoucí izolovat akcelerometr od zkoušeného objektu.

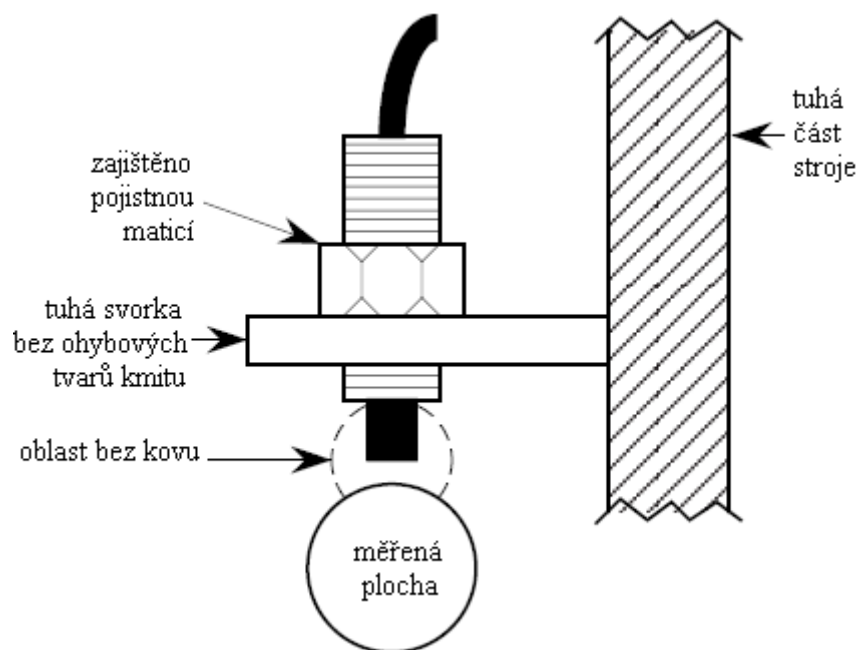
2.5.3 MONTÁŽ BEZDOTYKOVÉ SONDY

Elektrický výstup sondy na vířivé proudy, který odpovídá vibracím samotné sondy, není rozlišitelný od výstupu v důsledku vibrací měřeného povrchu. Proto musí být sonda na vířivé proudy namontována pevně, aby se zabránilo jejím vibracím.

Sondy mohou být namontovány zašroubováním do otvoru v existující části stroje, jako je skříň, nebo s použitím speciálních montážních svorek. Sonda musí být na místě zajištěna pomocí pojistné matice. Viz obrázky 23 a 24.



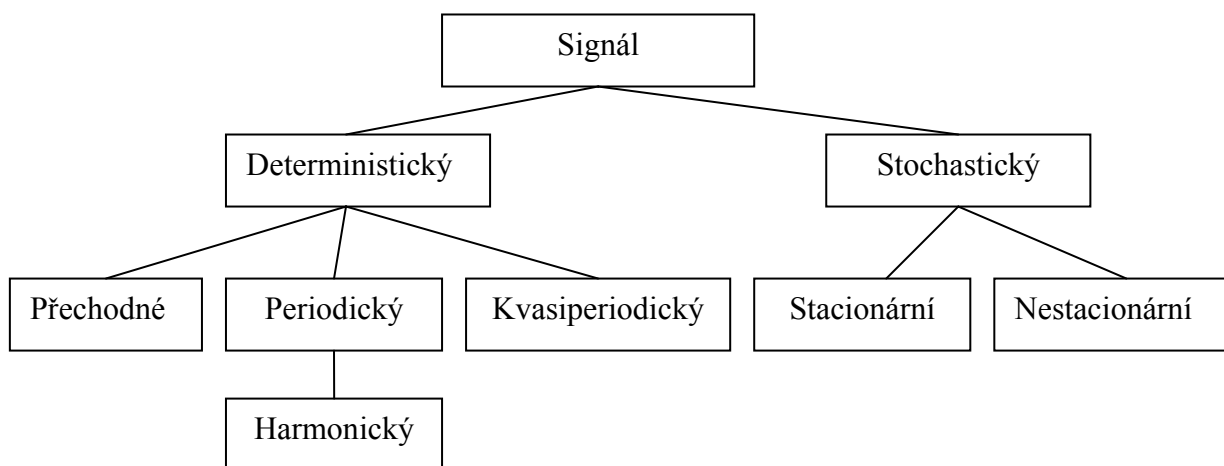
Obr. 23 Montáž sondy ve skříni



Obr. 24 Montáž sondy ve svorce

2.6 KLASIFIKACE SIGNÁLŮ

Abstraktní pojem „signál“ [1] se vztahuje jen na časové funkce reprezentující časové průběhy fyzikálních veličin. Na rozdíl od šumu signál obsahuje jen smysluplné informace o objektu, který signál generuje. Rozdělení signálů lze znázornit na obrázku 25.



Obr. 25 Klasifikace signálů podle náhodnosti jejich průběhu

Jednotlivé signály lze charakterizovat následovně:

Deterministický signál

Časový průběh signálu je determinován, a proto lze jeho průběh předvídat.

- Přechodový signál (časově omezený signál)
- Periodický signál (harmonické signály, které jsou násobkem jedné základní frekvence)
- Kvasiperiodický signál (harmonické signály, které jsou násobkem aspoň dvou základních frekvencí)

Stochastický signál

Náhodný signál, jeho průběh má nepředvídatelný vývoj.

- Stacionární (ustálený průběh signálu)
- Nestacionární (v čase měnící se průběh signálu)

2.7 ZÁKLADNÍ METODY VIBRAČNÍ DIAGNOSTIKY

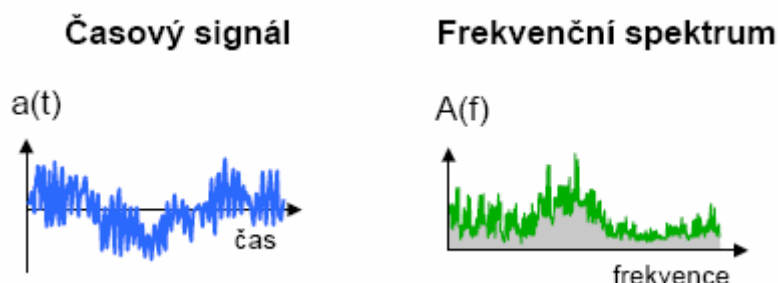
Vibrace strojů jsou obecně buzeny zevnějšku, a to kinematicky, silově, nebo samobuzením změnou parametrů apod. Pravidelnost buzení a jeho intenzita je dána technickým stavem a stupněm opotřebovanosti. Hlavním nástrojem vibrodiagnostiky je frekvenční analýza [1], ovšem existuje taky řada dalších metod používaných ve vibrodiagnostice.

1 FREKVENČNÍ ANALÝZA POMOCÍ FFT

Je to základní a nejběžnější analýza vibračních signálů. Znázorňuje v průběhu signálu periodické děje, které se poté zobrazí v souřadném systému. Při použití souřadného systému, v němž je zobrazena amplituda a frekvence, hovoříme o frekvenčním spektru, a při souřadném systému, který znázorňuje amplitudu a čas, tak mluvíme o časovém průběhu (Obr. 26). Získané hodnoty jsou pak zaznamenány, vyhodnocovány a následně zobrazovány v podobě tabulek a grafů. Z hlediska energie je časový průběh a frekvenční spektrum rovnocenné.

Rychlá Fourierova transformace je nejvyužívanější a to pro svoji:

- přesnost
- rychlost
- srozumitelnost nastavení
- univerzální realizaci



Obr. 26 Časový signál a frekvenční spektrum

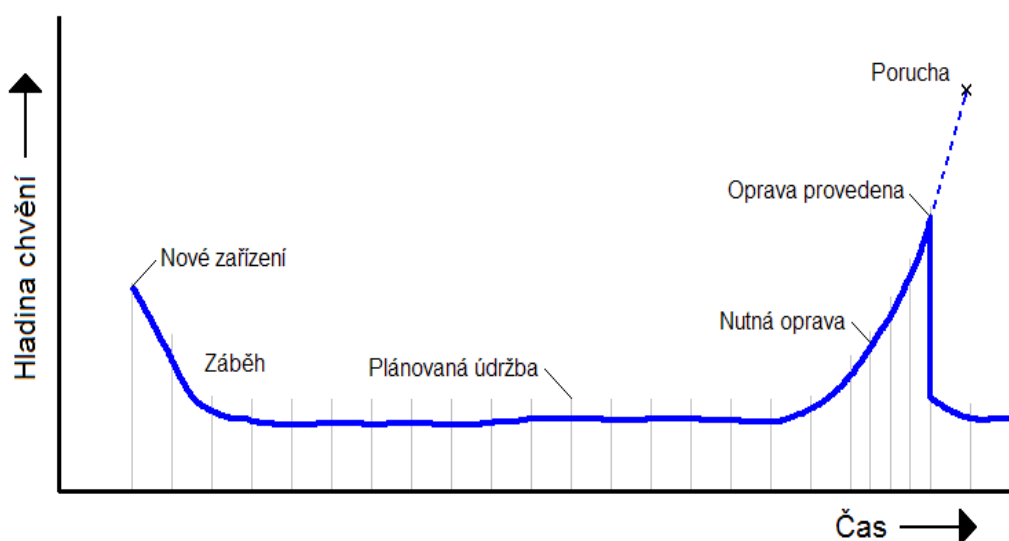
V provozu se měření provádí přímo na diagnostikovaném objektu, přitom je nutno dodržet podmínku provedení měření na objektu za opakovatelných a ustálených provozních podmínek.

2 CELKOVÁ MOHUTNOST VIBRACÍ (TRENDOVÁNÍ)

Celkovými vibracemi je myšlena celková vibrační energie měřená v určitém frekvenčním rozsahu (většinou 10 - 1000 Hz). Potřebné informace o objektivním technickém stavu stroje zjišťujeme porovnáním naměřených hodnot s jejich normální úrovní, a pak zjišťujeme, co způsobilo vyšší hodnoty. Pro hodnocení se používají informace z norem ČSN ISO 10 816-1 až 6.

Celková mohutnost (někdy intenzita) kmitů, je hodnota naměřená na funkčně důležitém místě stroje, kterou porovnáváme s její nastavenou limitní hodnotou. Tím získáváme informace o stavu daného objektu. Jestliže tyto hodnoty vyneseme do funkční závislosti, získáme vanovou křivku (Obr. 27), v podstatě je to časový průběh hladiny vibrací během technického života pro danou část stroje.

Trendový graf je časový graf, na kterém je zobrazená současná a předchozí hodnoty vibrací v závislosti na čase. Z trendového grafu je patrné, jaká je poloha k nastavené úrovni výstrahy, tzn. že zjistíme příčiny vznikající závady a provedeme příslušná údržbářská opatření.



Obr. 27 Vanová křivka

3 KEPSTRÁLNÍ ANALÝZA

Kepstrální analýza je metoda, hledající periodické děje ve frekvenčním spektru. Vzniká vícenásobnou analýzou signálu, při níž se hledají periodicky se vyskytující děje. Dají se jimi zjistit série harmonických nebo bočních pásem, nacházejících se ve frekvenčních spektrech.

Typickým příkladem je využití při zjišťování technického stavu ozubení u převodovek. Výhodou kepstrální analýzy je zachování signálů s nízkou úrovní a díky použití logaritmických funkcí také opakujících se amplitud ve vstupním signále.

4 ORBITÁLNÍ ANALÝZA

Zobrazení vibrací ve formě orbitu je zobrazení pohybu středu hřídele za jednu či více otáček kolem statické polohy hřídele. Lze tedy snadno zjistit směr pohybu hřídele vůči směru otáčení a odhadnout velikost amplitudy. U ložisek jde z tvaru orbitu zjistit směr působení radiálních sil v ložisku.

5 EXPERIMENTÁLNÍ MODÁLNÍ ANALÝZA

Zjišťují se kmitavé vlastnosti strojních konstrukcí, k možnosti rozkladu složitého kmitavého procesu na dílčí, tzv. modální příspěvky. Každý takový příspěvek je charakterizován modální frekvencí a modálním tvarem kmitu.

Měřením se zjišťuje odezva konstrukce při jejím řízeném buzení ve zvolené síti bodů na povrchu konstrukce. Využívá se především ke třem základním cílům:

- stanovení vlastních frekvencí soustavy
- stanovení tlumení na těchto frekvencích
- stanovení vlastní tvarů kmitů (deformace soustavy vibracemi na vlastní frekvenci)

Metoda je využitelná pro převážnou většinu strojních i stavebních konstrukcí. Měřicí a vyhodnocovací sestava se skládá z minimálně

dvoukanálové FFT aparatury a příslušného software. Podmínkami pro možnost použití metody a získání správných výsledků je linearita zkoumaného objektu.

6 METODA ZVIDITELNĚNÍ PROVOZNÍCH TVARŮ KMITU

Tato metoda je detailně popsána v kapitole číslo 3.

7 ALTERNATIVNÍ METODY

Jsou určeny pro specifické případy, a umožňují lepší analýzu daných objektů. Častými případy jsou např. ložiska či ozubená kola. Různé firmy využívají různé metody podle konkrétních případů.

➤ SPM (Shock Pulse Meter)

Jedná se o snímání krátkodobých vln vyvolávaných mechanickými rázy, které vznikají vlivem drsnosti ložiskových drah a valivých těles.

➤ BCU (Bearing Condition Unit)

Spočívá v nepřímém měření rázových impulsů pomocí energie akustických kmitů.

➤ Činitel výkmitu (Crest factor)

Je to vyhodnocení poměru špičkového zrychlení a jeho efektivní hodnoty ve frekvenčním pásmu 10Hz – 10kHz a časové posloupnosti.

➤ Činitel zesílení (Q faktor)

Využití poměru středních a špičkových hodnotou amplitudy emitovaného ultrazvukového signálu.

➤ Kurtosis

Posouzení statistického rozdělení amplitud chvění.

➤ **Obálková metoda**

Je používána u ložisek a ozubených kol, jejichž činnost má opakující se charakter, a vytváří vibrační signály s nižší amplitudou. Signál má tak nízkou energii, že se při běžném měření vytratí v šumu.

➤ **SEE (Spectral Emitted Energy)**

Poskytuje včasnou detekci závad ložisek a ozubených kol měřením akustické emise tvořené kovem. Emise je v oblasti stovek kHz, dává zejména signál o zhoršeném mazání a někdy i o mikrokontaktech kov – kov.

➤ **HDF (High Frequency Detection)**

Udává číselnou hodnotu celkové úrovně vibrací generovaných ve vysokofrekvenčním pásmu (5kHz – 60kHz).

3 METODA ZVIDITELNĚNÍ PROVOZNÍCH TVARŮ KMITU

Tato metoda, někdy také nazývaná jako metoda strukturální stroboskopie [1], se opírá o využití programových prostředků pro animaci, které byly původně vyvinuty pro znázornění vlastních kmitů, stanovených modální analýzou. Při animaci se skutečný pohyb zesiluje do výchylek vnímatelných lidským okem a je zpomalen na nízkou frekvenci. Zjednodušeně lze říci, že principem této metody je spojení měření se softwarovým zpracováním spekter vibrací.

Provozní tvary kmitu, obecně označovány jako PTK znázorňují reálné kmitání stroje při provozním zatížení. Animace je velmi účinným a názorným prostředkem pro specifikaci provozních problémů, které souvisí s vibracemi a hlukem.

Provozní tvary kmitu [3] mohou být měřeny přímo pomocí relativně jednoduchých prostředků. Tyto tvary kmitů poskytují velmi užitečné informace pro pochopení a vyhodnocení dynamického chování stroje, složky nebo celé struktury. Poněvadž pochopení celého děje může tvořit převážnou část z celé cesty k možnému řešení, může vizualizace dynamického chování pomocí PTK vést diagnostika k bodu na struktuře, ve kterém lze provést optimální modifikaci, aby byl řízen problém hluku, vibrací, aby byla potlačena únava, zmenšeno opotřebení, nebo také aby byly řešeny s tím spojené problémy. Modifikace může být podpořena jednou nebo několika frekvenčními odezvami pro kontrolu, zda existují rezonanční podmínky. Při každé frekvenci, která nás zajímá, se z měření určuje relativní amplituda a relativní fáze. Amplitudy a fáze jsou potom sestaveny do vektorů (jeden pro každou frekvenci), které představují relativní provozní tvary kmitu při dané frekvenci. Absolutní provozní tvar kmitu se potom získá vynásobením absolutní odezvou.

Provozní tvary kmitu lze určit také z matematického modelu (modálního modelu) za předpokladu, že jsou k dispozici okrajové podmínky a známe-li provozní síly. Jestliže je však cílem studie určité soustavy jeden nebo několik specifických stavů, potom je přímé měření rychlejší, jednodušší a přesnější než analytický výpočet. Protože zde nemusíme zavádět žádné předpoklady, jako je třeba předpoklad linearity.

3.1 ZÁKLADNÍ POJMY A DEFINICE

Jednoduchá soustava [3], která má vynucené kmitání v důsledku libovolného buzení. Na obrázku 28. je jednostranně vetknutý nosník a $x(\xi, t)$ označuje spojitou funkci vynucené výchylky v jedné souřadnici x jako funkci polohy ξ a času t .

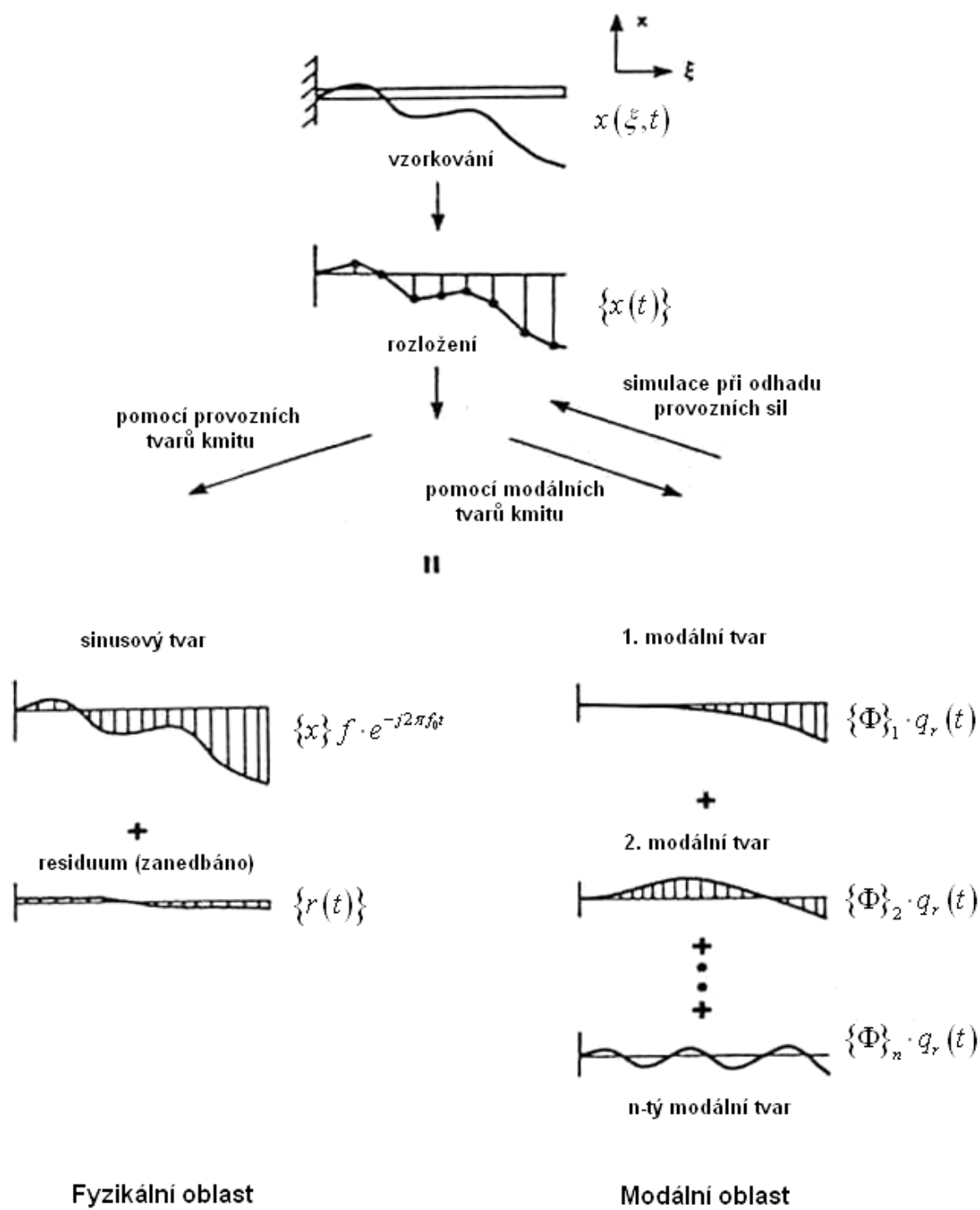
Chceme-li popsat vynucenou výchylku, použijeme konečný diskretní popis, vzorkovaný jak v čase, tak v prostoru, místo abychom použili spojitou funkci. Potom $\{x(t)\}$ označuje tvar vynucené průhybovky, což je vektor, ve kterém prvky reprezentují časový průběh výchylky v každém definovaném bodě a v definovaném směru, nebo v každém definovaném stupni volnosti. Zde x je libovolný symbol, který může reprezentovat výchylku v libovolné souřadnici. Určité místo vektoru se vztahuje k definovanému stupni volnosti na objektu.

3.2 MODÁLNÍ ROZKLAD

Tvar vynucené průhybovky [3] u lineární soustavy lze popsat jako lineární kombinaci jejích vlastních tvarů kmitu.

Libovolný tvar kmitání jde pomocí modální analýzy rozložit na jednoznačné tvary kmitu. V případě, že jsou modální parametry známy, lze deformaci určit analyticky simulací tak, že necháme na modální model působit odhadnutý vektor buzení.

Je důležité vědět, že $\{\Phi\}_r$ je vlastní tvar kmitu, je časově neproměnný popis výchylek (tvar kmitu nekmitá!) a je to kvalitativní vlastnost daného systému. Časová proměna je v měřítkovém koeficientu rovnice, v zevšeobecnělé neboli modální odezvě $q_r(t)$.



Obr. 28 Rozklad tvaru vynucené výchylky

3.3 ROZKLAD POMOCÍ PROVOZNÍCH TVARŮ KMITU

Tvar průhybovky je možno také rozložit [3] na provozní tvary kmitu :

$$\{x(t)\} = \{X\}_{f_0} \sin(2\pi f_0 t) + \{r(t)\} \quad (5)$$

$\{X\}_{f_0}$ obsahuje sinusovou část vibrací a reziduální vektor $\{r(t)\}$ obsahuje zbývající vibrace při jiných frekvencích. Provozní tvar kmitu není jedinečný ve stejném slova smyslu jako modální tvar. Provozní tvar kmitu je závislý na provozních podmínkách, volbě frekvence, a je tedy platný jen pro jedny určité podmínky. Jak dobře provozní tvar kmitu prezentuje $\{x(t)\}$ závisí na tom, jak čistě sinusová je odezva. Pro velmi širokou řadu praktických problémů hluku a vibrací zkušenosti ukazují, že takřka všechen vibrační výkon je obsažen v jedné frekvenční čáře a proto reziduální člen $\{r(t)\}$ z rovnice (5) se stává zanedbatelným. Při řešení problémů s vibracemi nebo hlukem je to stejně použitelné jak u periodických vynucených problémů, tak u náhodně buzených modálních tvarů. Pokud ale vibrační spektrum obsahuje více významných frekvenčních čar, třeba u harmonických složek, potom lze rovnici (6) rozvinout tak, aby obsahovala sumu provozních tvarů kmitů.

3.4 VLASTNÍ A PROVOZNÍ TVARY KMITU

Provozní tvar kmitu je lineární kombinace modálních tvarů. Je-li ovšem budící frekvence blízko modální frekvence a jsou-li modální tvary struktury dobře odděleny, pak se podíl ostatních modálních tvarů může stát bezvýznamný a provozní tvar kmitu může mít stejné rozložení výchylky jako přidružený modální tvar. Rozdíl je v tom, že PTK má absolutní amplitudy vibrací na rozdíl od modálního tvaru.

3.5 MĚŘENÍ PROVOZNÍCH TVARŮ KMITU

3.5.1 SYSTÉMOVÝ PŘÍSTUP

Při systémové analýze se předpokládá linearita systému a vytváří se hybridní technika. Modální zkouška (v plném měřítku) dává modální tvary v měřítku, modální frekvence a tlumení. To jsou parametry pro úplný dynamický matematický model, tzn. modální model. V podstatě určuje a modeluje inherentní dynamické vlastnosti struktury. Provozní tvar kmitu lze simulovat tak, že model zatížíme předpokládanými provozními silami.

Největší problém této techniky spočívá v sestavení vhodných funkcí pro kvantitativní budící síly definované v prostoru, a to co do velikosti i fáze. I přes tyto problémy tato technika dává dynamický model, použitelný pro simulaci několikanásobných podmínek. Ukázala se tedy jako cenný analytický nástroj při mnoha aplikacích.

3.5.2 SIGNÁLOVÝ PŘÍSTUP

Přímé měření PTK ve stacionárních podmínkách je vhodnější v mnoha situacích, např.:

- když nás zajímá pouze jeden provozní stav nebo několik provozních podmínek lze těžko zdůvodňovat modální zkoušku
- když jsou provozní síly nepozorovatelné nebo nedefinované, potom nemůžeme vědět, jak zatěžovat model
- když se očekává, že struktura je výrazně nelineární a není k dispozici parametrická modelovací technika

Přímé určení PTK vyžaduje měření množiny odezvových signálů, prostorově rozložených po té části soustavy, která nás zajímá. Odezvy se měří postupně.

Při použití dvoukanálového analyzátoru lze zahrnout obecnou referenční hodnotu, abychom dostali:

- relativní amplitudu a informaci o fázi
- kompenzaci při malých odchylkách úrovně odezvy v průběhu sekvenčního měření

U praktických měření se jako referenční používá signál ze snímače pohybu a druhý (přesouvaný) snímač pohybu se postupně přemísťuje při definování dalších stupňů volnosti při zkoušce. Pozorovaný je komplexní parametr transmissibilita. Tato technika je jednoduchá a dává výsledek pro jeden stav, tento výsledek je kvantitativně i kvalitativně aplikovatelný pouze na tento určitý stav, který byl při měření.

Zjednodušeně lze říci, že použití tohoto přístupu se vztahuje na situace, ve kterých je stroj zjevně v nepořádku.

3.5.3 TRANSMISSIBILITA

Reprezentuje [3] poměr mezi dvěma spektry nebo poměr mezi dvěma různě váženými sumami pracovních sil, a udává relativní výchylku mezi dvěma stupni volnosti jako funkci frekvence.

Definujeme ji jako komplexní transmissibilitu :

$$T_{ij}(f) = \frac{X_i(f)}{X_j(f)} \quad (6)$$

Kde j je referenční stupeň volnosti a i je libovolný stupeň volnosti. $T_{ij}(f)$ je poměr mezi Fourierovým spektrem zkušebního stupně volnosti a spektrem referenčního stupně volnosti.

V případě jednoho vstupu je $T_{ij}(f)$ poměrem mezi dvěma frekvenčními funkcemi. Popisuje dynamické vlastnosti mezi stupni volnosti i a j a provozní silou (která se vyruší). V případě více vstupů se jedná o poměr dvou lineárních kombinací spekter provozních sil.

$T_{ij}(f)$ není ovlivněna změnami úrovně buzení za předpokladu linearity struktury a za předpokladu, že rozložení a fáze síly jsou konstantní, což je důležitá vlastnost při praktických měřeních.

Praktický odhad $T_{ij}(f)$ může být proveden při použití libovolného způsobu odhadu frekvenční funkce. Předpokládá se, že koherence je jednotka, libovolný způsob odhadu musí dát stejný výsledek při frekvencích, které nás zajímají.

3.5.4 KOHERENCE

Vytváří ji Fourierův analyzátor [4] ve spojení s měřením transmissibility, který je výrazem lineárního vztahu mezi měřenými signály ve dvou kanálech. Je prokázáno, že korelace mezi dvěma signály musí být 100% při všech frekvencích, protože je způsobuje stejná síla. Pokud při určitých frekvencích je koherence menší než jedna (v praxi vždy), je to důsledkem podmínek měření.

Koherence musí být jednotka při frekvencích, které nás zajímají, pokud není při měření zavedena velká chyba (v případě odpadnutí jednoho ze snímačů nebo poškození kabelu atd.).

Koherence dává informaci pouze o tom, jaká jsou skutečná měření. Neříká nám nic o systémových vlastnostech, tzn. o nelineárních vlivech, ale indikuje, zda se změnilo rozložení buzení v průběhu průměrování. Přímo u PTK se koherence nepoužívá.

3.6 METODIKA NASAZENÍ PTK

Aplikace metody na konkrétní objekt [4] spočívá v provedení několika kroků:

1 GEOMETRIE

Nejprve se na konstrukci definují body a směry, které nás zajímají. Počet stupňů volnosti a jejich prostorové rozložení lze zvolit libovolně tak, aby to vyhovovalo aplikaci. To je rozdíl proti modální zkoušce, u které musí být stupně volnosti definovány dostatečně hustě při reprezentativním rozložení.

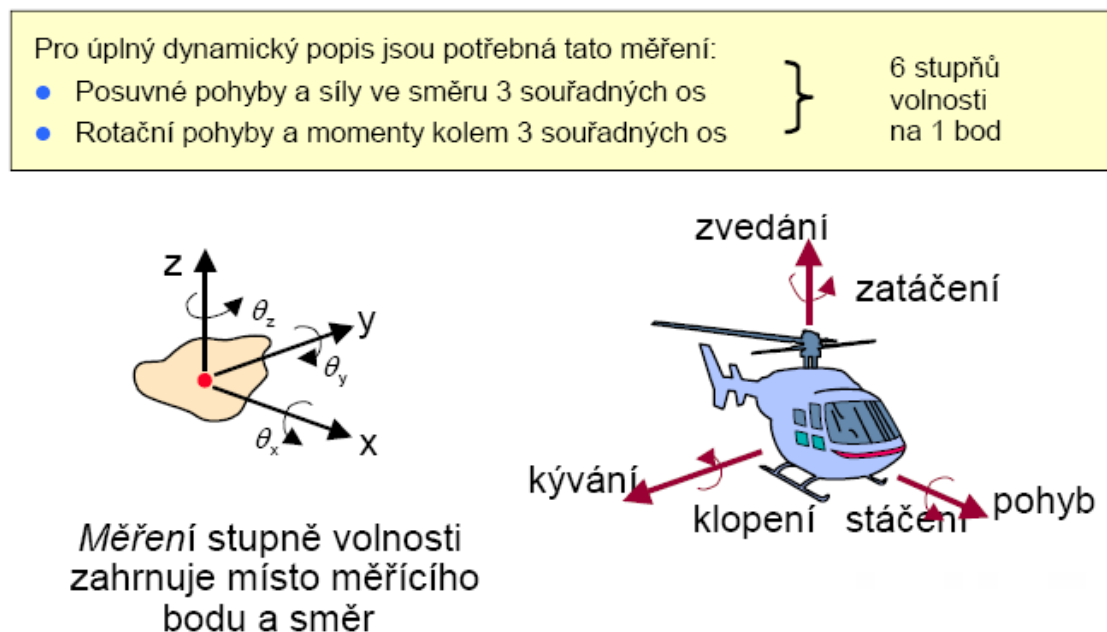
Jelikož se referenční stupeň volnosti porovnává se všemi ostatními stupni volnosti, je potřeba pečlivě zvážit volbu referenčního bodu. Přirozenou

volbou může být bod s maximální odezvou. To zajistí nejlepší možný poměr signálu a šumu pro měření.

Geometrický model je možné při řešení zjednodušovat, avšak začít práci s příliš jednoduchým modelem může znamenat, že vůbec nedospějeme k cíli (pochopení poměrů při daných provozních podmínkách). Z toho plyne, volit raději více bodů než je třeba.

Při volbě stupňů volnosti se nesmí podcenit ani zdánlivě malé kmitání v jednom směru při dominantním kmitání v jiném směru. Zejména tehdy, když na začátku analýzy není nic známo o skutečné příčině. Je tedy nutné měřit všechny tři směry.

Úplný dynamický popis [11] bodu vyžaduje měření šesti stupňů volnosti. Většinou jsou některé z nich zanedbány. Pokud mluvíme o stupních volnosti, tak máme na mysli, že měření jednoho bodu (Obr. 29) sestává z určení polohy bodu a směrů, ve kterých měříme.



Obr. 29 Stupně volnosti jednoho bodu

2 PROVOZNÍ PODMÍNKY

Před provedením měření je nutné ustavit určité provozní podmínky a je nutné učinit opatření, aby zůstaly zachovány konstantní po dobu sběru dat.

3 PARAMETR MĚŘENÍ

PTK bude stejný, ať vybereme kterýkoliv parametr vibrací pro měření výchylky, rychlosti nebo zrychlení. Přirozenou volbou je měřit zrychlení, protože je méně ovlivňováno nízkofrekvenčním pohybem struktury jako tuhého tělesa. Kromě toho jsou akcelerometry nejlepší snímače ve smyslu poměru signálu šumu, dynamického rozsahu, směrovosti atd.

4 MĚŘENÍ TRANSMISSIBILITY

S dvoukanálovým FFT analyzátozem můžeme použít standardní techniku měření frekvenční odezvy funkce pro určení transmissibility. Signál z přemísťovaného i referenčního snímače mají silně lineární vztah, protože oba jsou výstupem společného budícího mechanismu. Lze tedy použít kteroukoliv metodu pro určení frekvenčního přenosu, která je založena na použití průměrovaných spekter, a dostaneme identické výsledky.

5 POČÍTAČEM PODPOROVANÁ MĚŘENÍ

V průběhu měření, při určování PTK a při jejich dokumentování velmi napomáhá standardní programové vybavení pro modální analýzu. Postupem zkoušky pak je:

- Sběr dat (měření a uložení definované množiny funkcí transmissibility)
- Redukce dat (protože pro transmissibilitu neexistuje žádný matematický model, není možná aproximace naměřených dat, program tedy pomáhá určit komplexní poměry zápisem velikosti fází při požadovaných frekvencích)

3.7 ZJEDNODUŠENÝ POSTUP NAsAZENÍ PTK

Jedná se o poněkud upravenou metodu [4], u které se používá pouze jednokanálový analyzátor s možností odečtu fáze sledované frekvenční složky vůči referenční značce. Při skutečném měření se tedy nejprve zjistí dominantní složka vibrací. Potom se zaznamenává přímo amplituda a fáze této dominantní složky, ale s rizikem, že je měření zatíženo nevykompenzovanými odchylkami. Ale vzhledem k tomu, že metoda má charakter kvalitativní metody, zviditelňuje pouze hlavní složku kmitání. Zjednodušený postup metody spočívá v následujících bodech:

- ❖ definování geometrického modelu
- ❖ volba stupňů volnosti (směry kmitání ve zvolených bodech)
- ❖ volba (zajištění) dominantní frekvence
- ❖ odečet amplitudy a fáze zvolené frekvenční složky
- ❖ zviditelnění pomocí upravené části programu pro modální analýzu nebo pomocí speciálního programu pro animaci

4 PTK TURBOGENERÁTORU – MECHANICKÉ UVOLNĚNÍ

Měřeným objektem je zadní stojan turbogenerátoru TG 33 (Obr. 30) v elektrárně Třebovice, který vykazuje nadměrné vibrace v axiálním směru na 2. harmonické složce otáčkové frekvence. Měření bylo provedeno studenty VŠB – TUO.



Obr. 30 Zadní stojan turbogenerátoru

4.1. POUŽITÉ VYBAVENÍ A NASTAVENÍ MĚŘENÍ

Pro měření je použit analyzátor PULSE se 4 vstupními kanály, odezva je snímána třiosým akcelerometrem BK4321 a jako referenční snímač je použit akcelerometr BK4383.

Pro měření se použije program Modal Test Consultant (Obr. 31). Je potřeba udělat drobnou úpravu aby s jeho využitím bylo možné měřit i PTK. Referenční snímač BK4383 je zařazen do databáze snímačů pod názvem ODS4383 jako snímač síly a měření se z hlediska softwaru tváří jako modální

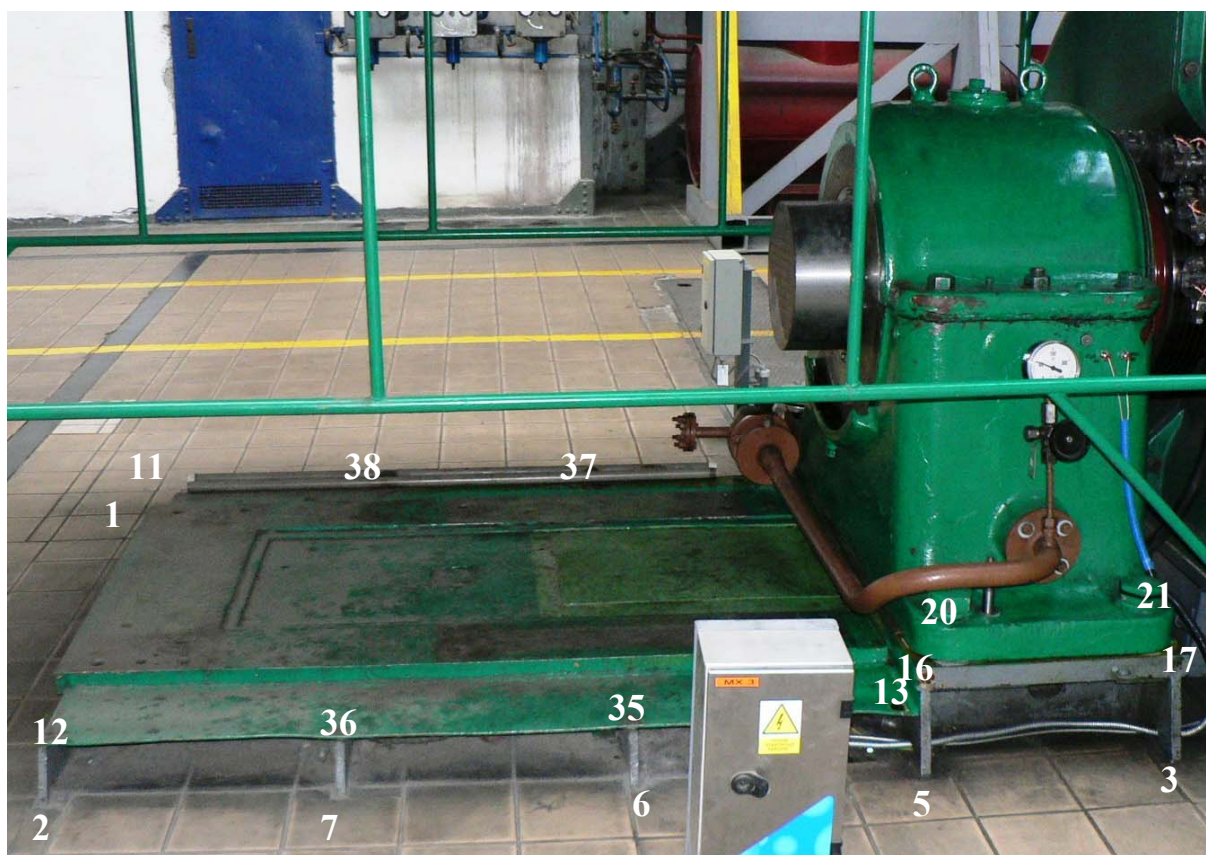
analýza s použitím budiče. Naměřené transmissibility se tedy vydávají za frekvenční odezvosvé funkce. To ovšem není závada. K vyhodnocení měření se použije software STAR, kterému tento postup nevadí.

All	Basic	Calibration	Channel	Ext. Amp	Transducer	Vibration						
	Status	Frame	Module	Slot	Chn	Channel Type	Transducer Family	Transducer Type	Transducer Serial Number	Transducer Name	Transducer Description	Transducer Nom. Sensitivity
Filter												
1.1.1		3560C	7533	1	1	Input						
1.2.1		3560C	3109	2	1	Input	Force	ods4383		ods4383	Hammer Charge	-3.19m V/N
1.2.2		3560C	3109	2	2	Input	Accelerometer	nas 04321X		nas 04321X		-1m V/msZ?
1.2.3		3560C	3109	2	3	Input	Accelerometer	nas 04321Y		nas 04321Y		-1m V/msZ?
1.2.4		3560C	3109	2	4	Input	Accelerometer	nas 04321Z		nas 04321Z	DeltaTron Acc	-1m V/msZ?

Obr. 31 Nastavení hardwaru pro měření PTK

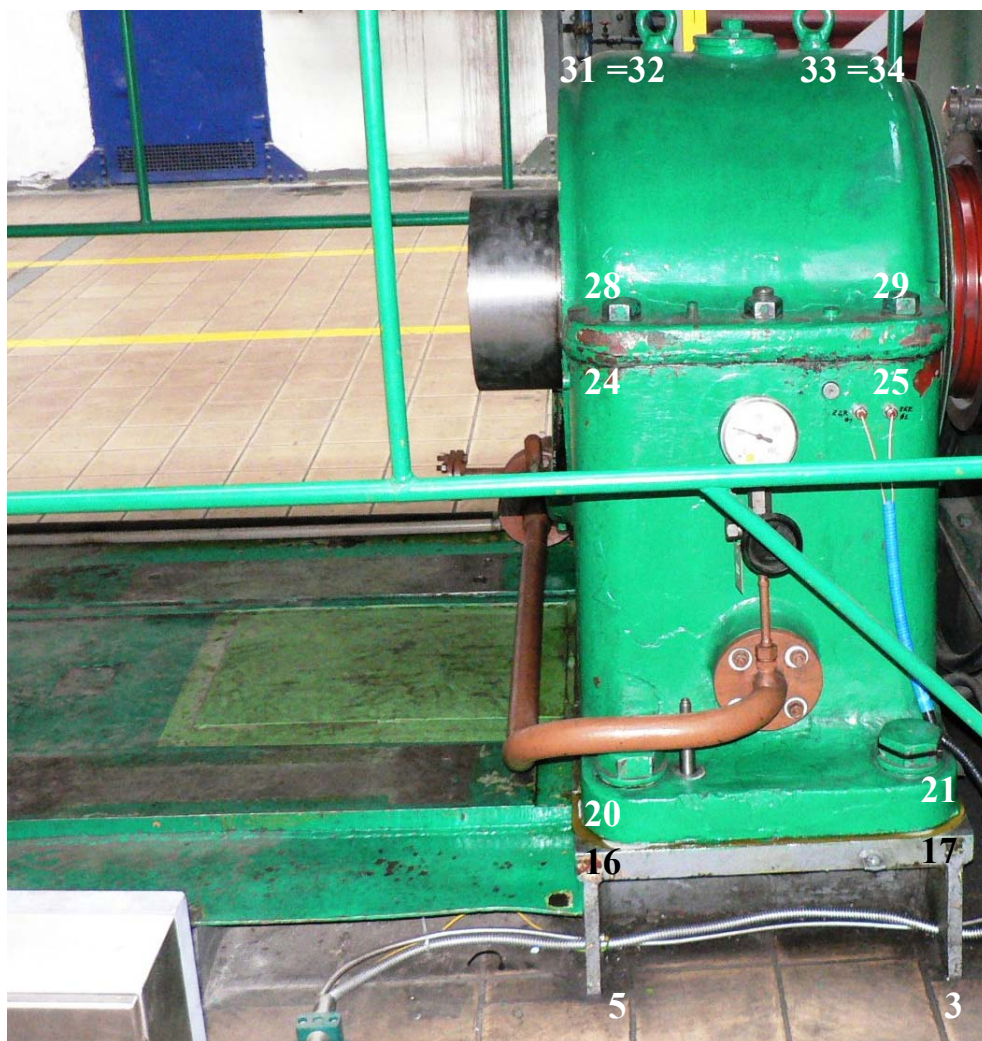
4.2 VOLBA MĚŘENÝCH BODŮ

Nejdříve je na stroji nutné definovat body a směry, které jsou pro nás důležité. Pro dostatečnou analýzu problému je nutno se nesoustředit jen na



Obr. 32 Zvolené body základové desky a podstavy stojanu

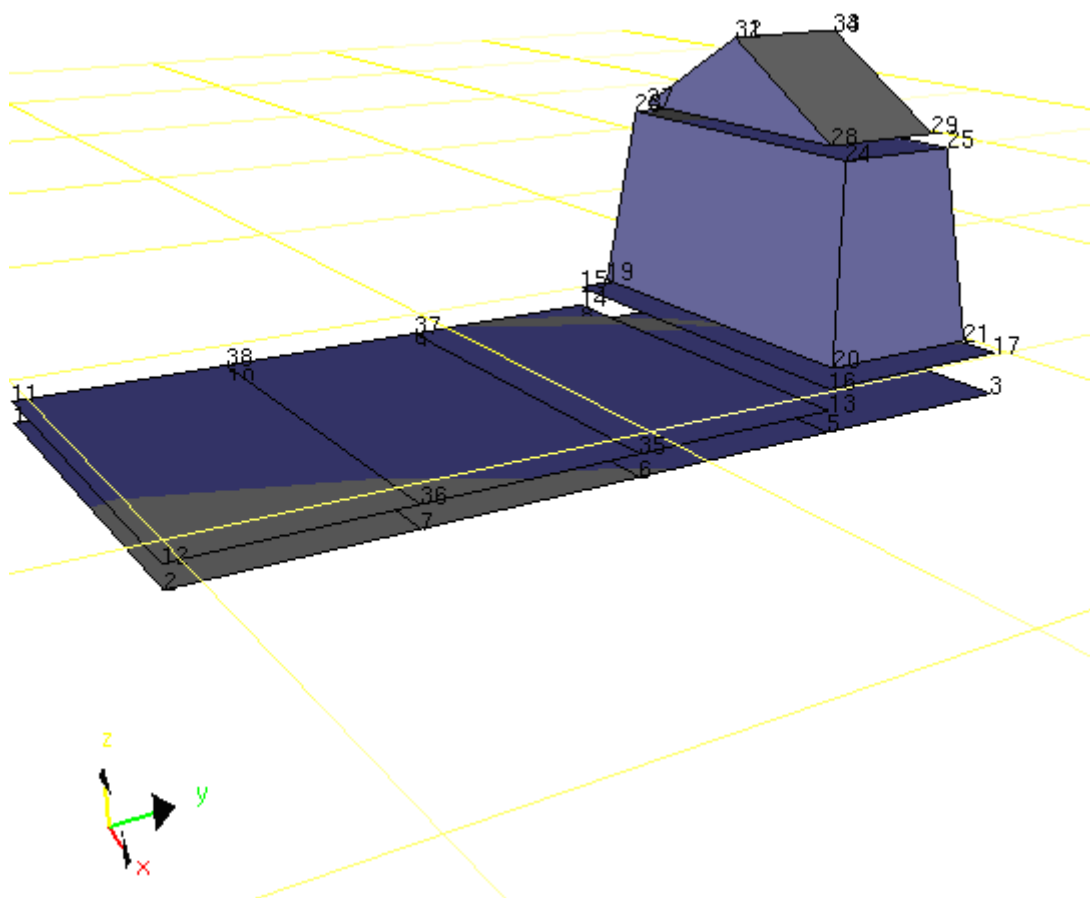
samotný stroj, ale vzít v potaz celkovou konstrukci včetně základů. Volba bodů na základové desce a podstavě je znázorněna na obr. 32 a samotný zadní stojan turbogenerátoru je pak popsán na obr. 33. Celkový počet měřených bodů je v tomto případě 38.



Obr. 33 Zvolené body stojanu turbogenerátoru

4.3 GEOMETRICKÝ MODEL

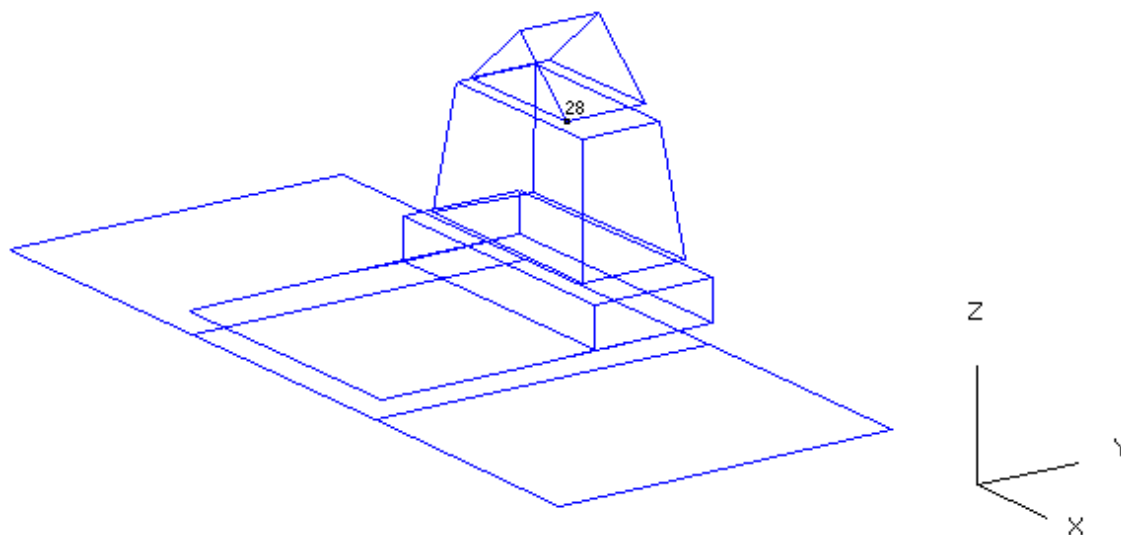
Pomocí zvolených bodů je vytvořen základní geometrický model, pomocí soustavy souřadnic tak, aby schéma měřené struktury dávalo při animaci dostatečnou představu o charakteru provozních tvarů kmitu. Model je zobrazen na obr. 34.



Obr. 34 Model měřené struktury

Při volbě stupňů volnosti daného měření nezanedbáváme žádný směr kmitání, měříme tedy všechny tři translační posuvy. Důležitá je také volba referenčního snímače (BK4383). Nejčastěji se volí bod s maximální odezvou,

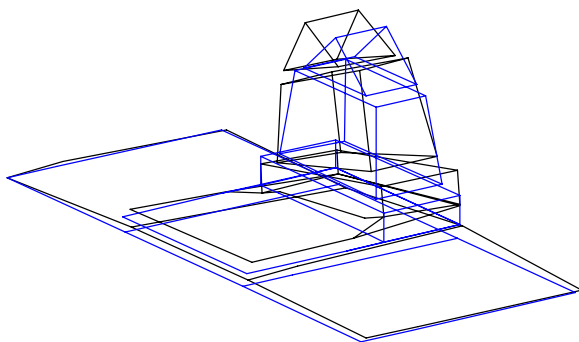
což je uskutečněno i v našem případě. Model struktury s vyznačením referenčního bodu (stupeň volnosti 28Y) je uveden na obrázku 35.



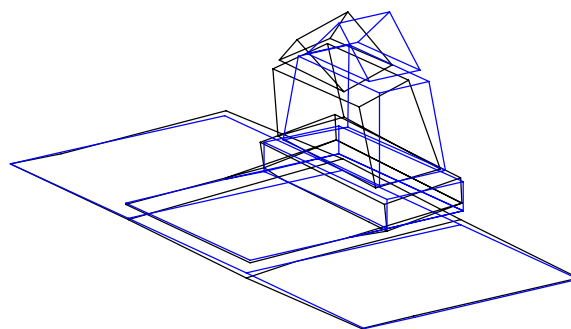
Obr. 35 Model struktury – referenční bod

4.4 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Z naměřených dat pro provozní tvary kmitu byly získány vhodné tvary kmitu pro dvě frekvence. První (50 Hz) a druhou (100 Hz) harmonickou složku otáčkové frekvence (Obr. 36 a 37). Z provozní modální analýzy se získají jako výsledky módy, které odpovídají provozním tvarům kmitů.

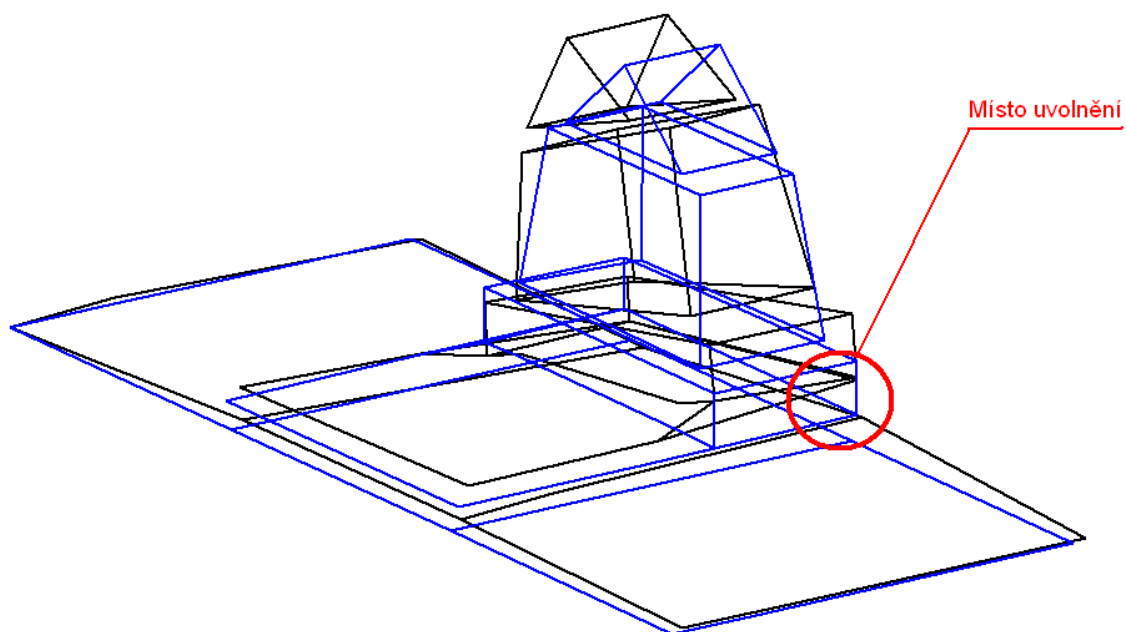


Obr. 36 Provozní tvar kmitu na 50 Hz



Obr. 37 Provozní tvar kmitu na 100 Hz

Na obrázcích s animacemi (Obr. 38) je vidět, že velké axiální vibrace stojanu turbogenerátoru jsou způsobeny mechanickým uvolněním ocelové základové desky. Tato deska se v uvolněném místě mírně ohýbá – kmitá ve vertikálním směru.



Obr. 38 Místo mechanického uvolnění základové desky

5 PTK TURBÍNY – APLIKACE NA OSU ROTOROVÉ SOUSTAVY

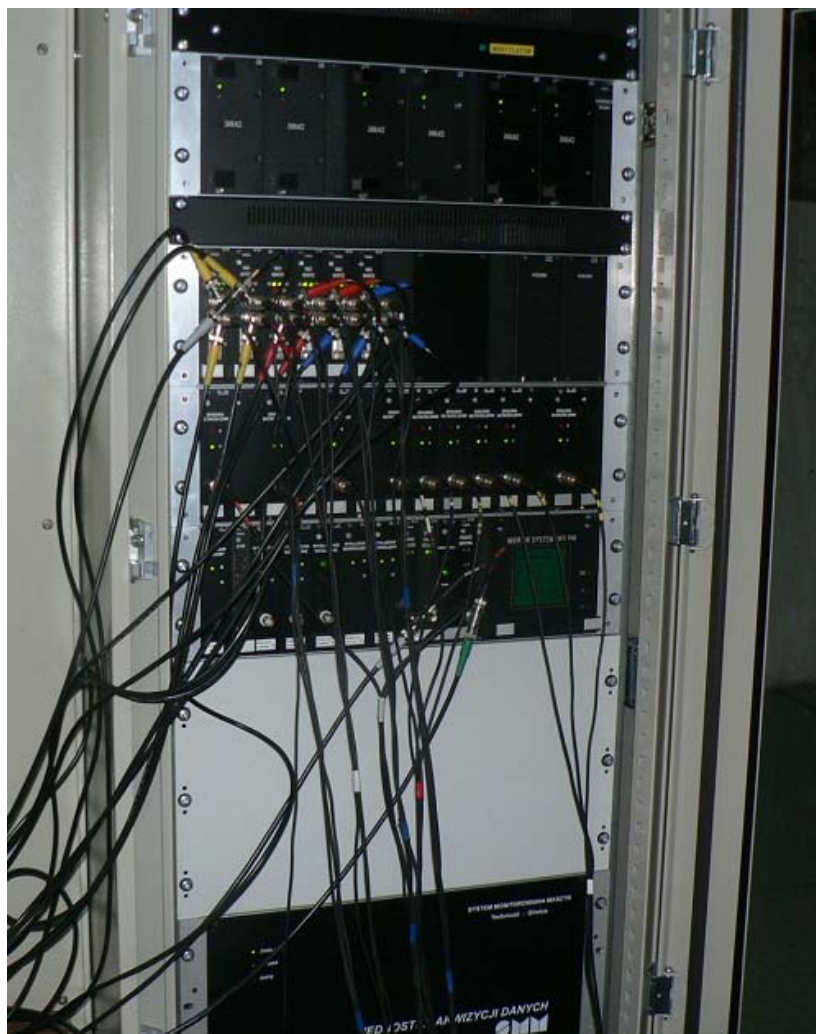
Objektem diagnostiky je turbína TG5 (Obr. 39) v Polanieci (Polsko). Po určitých úpravách se turbína chovala neustáleně s ohledem na vibrace, při doběhu byl pozorován výskyt velmi vysokých vibrací. Účelem v tomto případě je jako dodatek provedeno vyhodnocení měření relativních vibrací, sledováním chování rotorové soustavy při různých provozních režimech 0 MW (naprázdno), 110 MW a 200 MW.



Obr. 39 Soustrojí turbíny a generátoru TG5

5.1 POUŽITÉ VYBAVENÍ

Součástí turbíny je její vlastní systém měření vibrací a zabezpečení (Obr. 40). Naměřená data amplitudy a fáze byla zpracována z magnetofonové nahrávky z tohoto systému. Nahrávka signálů byla provedena na 32 kanálovém magnetofonu SONY PC 216Ax a analyzátoru Mikrolog CMXA 80 (Obr. 41).

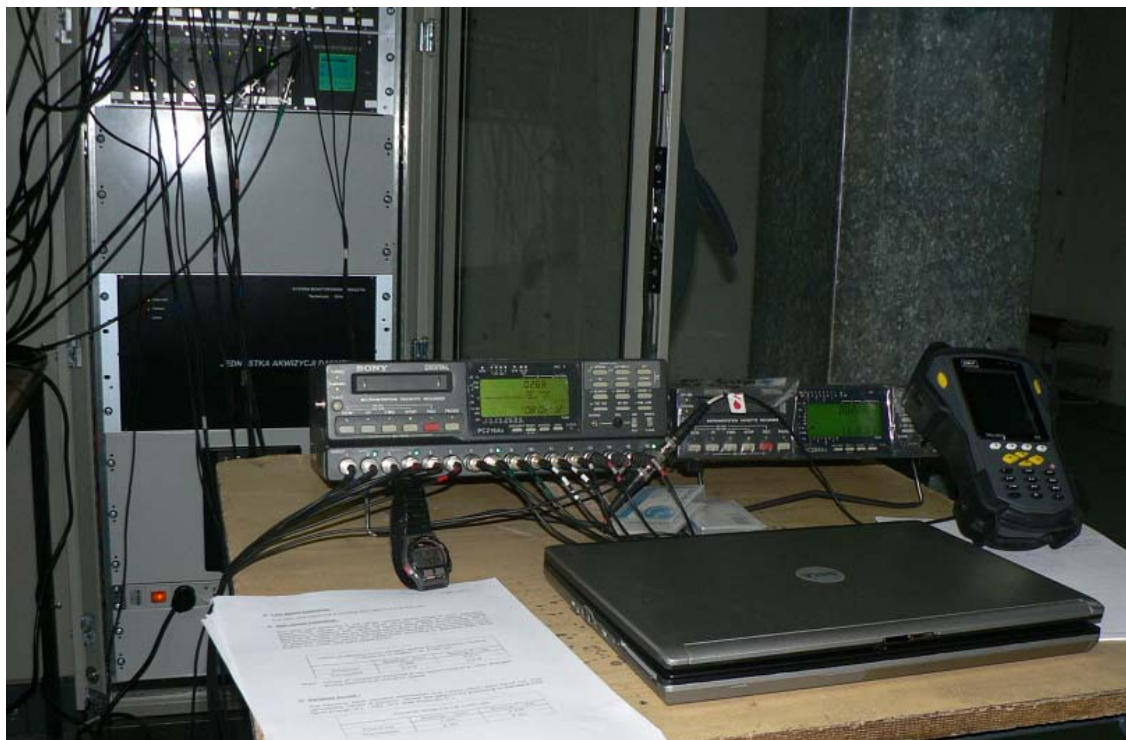


Obr. 40 Skříň systému zabezpečení turbíny s výstupem oddělených signálů pro diagnostiku



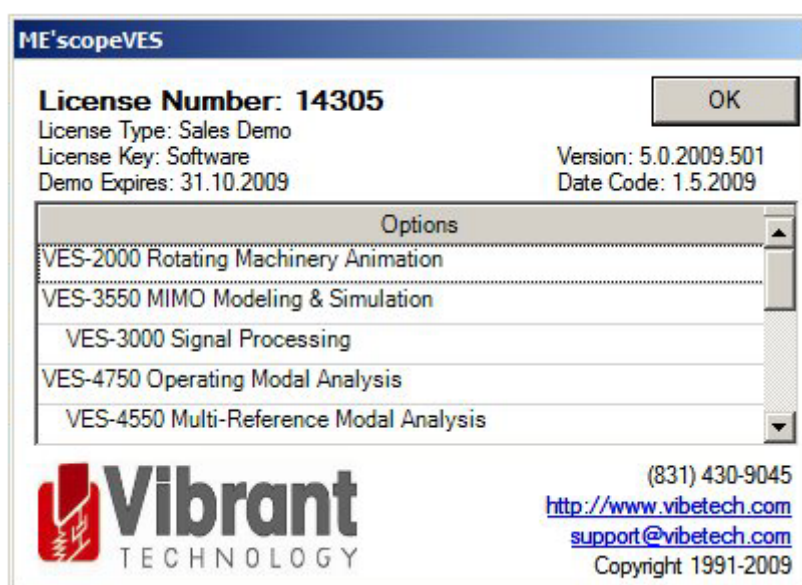
Obr. 41 Měřicí magnetofon PC 216Ax a analyzátor CMXA 80

Zapojení měřících přístrojů na diagnostický systém turbíny je znázorněno na obr. 42.



Obr. 42 Zapojení přístrojů

Použitým softwarem pro zviditelnění provozních tvarů kmitu je ME'scopeVES (Obr. 43).

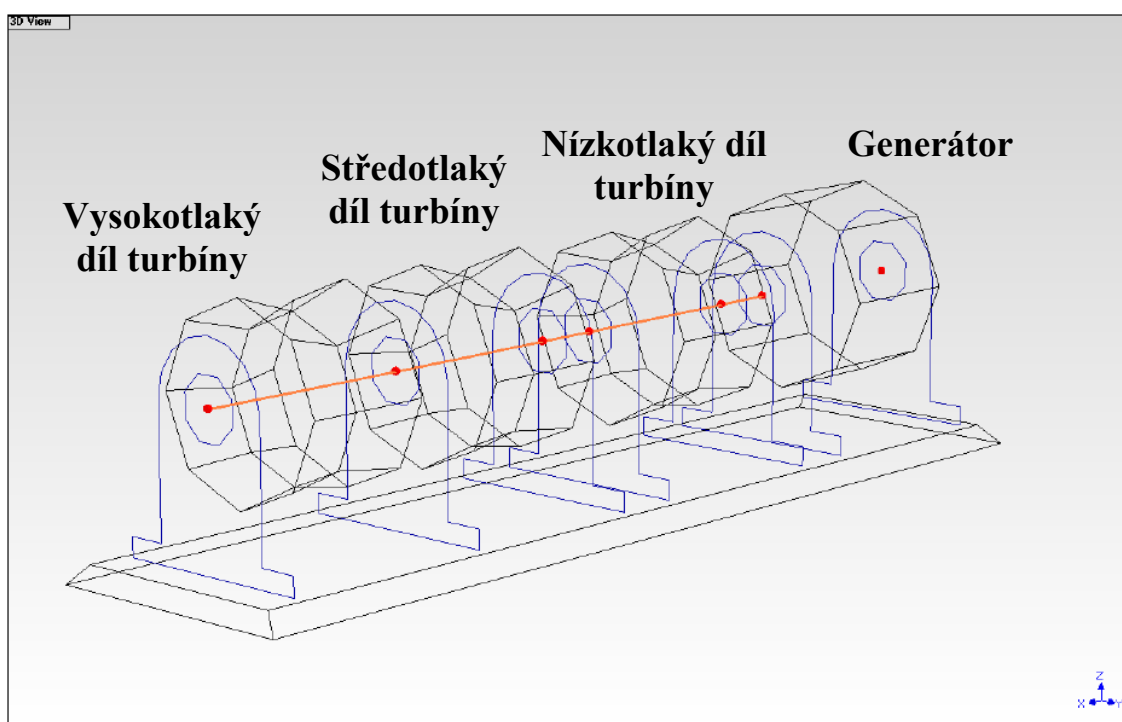


Obr. 43 ME'scopeVES

5.2 VOLBA PARAMETRŮ PRO ANALÝZU PTK

5.2.1 GEOMETRICKÝ MODEL

Pomocí programu ME'scopeVES vytvoříme základní geometrický model turbíny. Geometrický model (Obr. 45) obsahuje celkem 315 bodů (viz. příloha) a tvoří se vytvořením bodů a definováním jejich souřadnic. Poté se mezi body dělají spojnice (přímky).



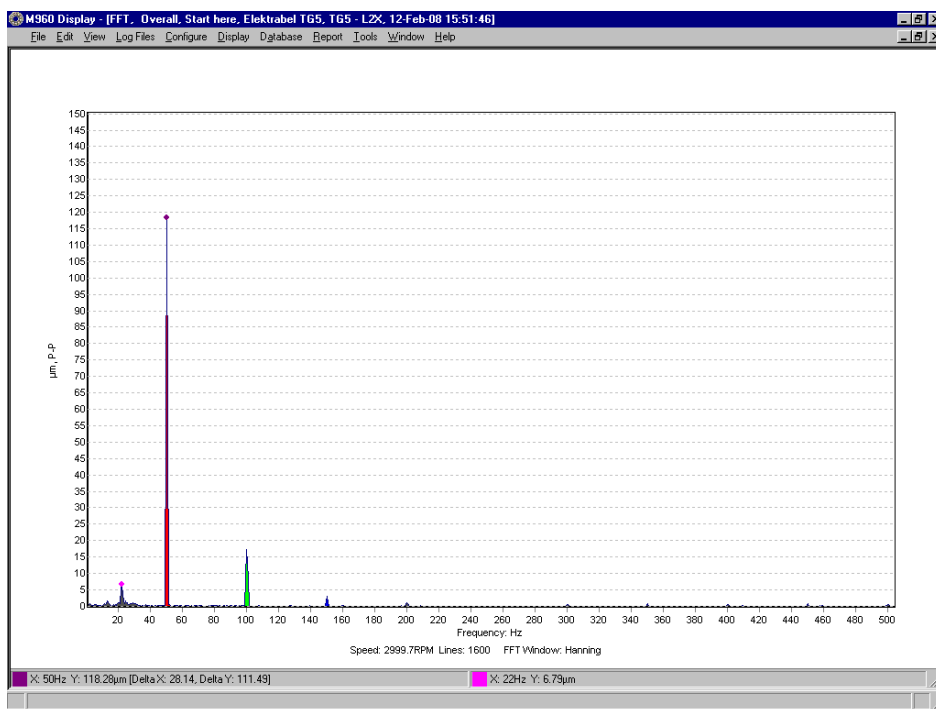
Obr. 45 Geometrický model s popisem turbíny TG5

5.2.2 VOLBA STUPŇŮ VOLNOSTI

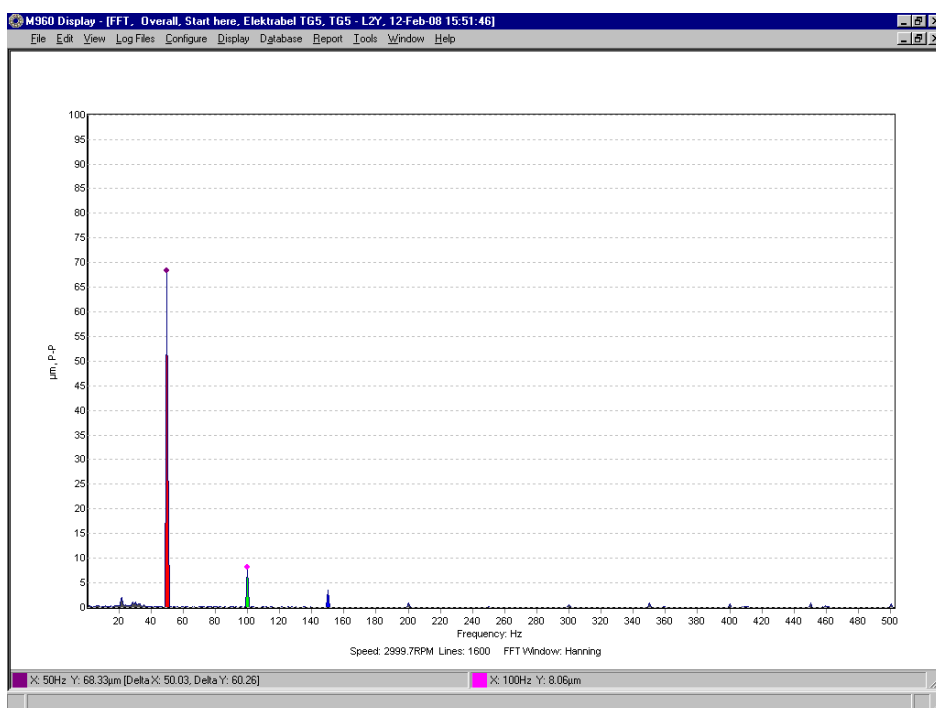
V našem případě se jedná o měření, vyhodnocované z nainstalovaných snímačů relativních vibrací. Tato skutečnost limituje volbu stupňů volnosti na dva (x,y) v každém měřeném bodě.

5.2.3 VOLBA (ZJIŠTĚNÍ) DOMINANTNÍ FREKVENCE

Z měřených vibrací vyplývá, že dominantní frekvence je otáčková složka vibrací, tj. složka 50 Hz jak pro směr x (Obr. 46), tak pro směr y (Obr. 47).



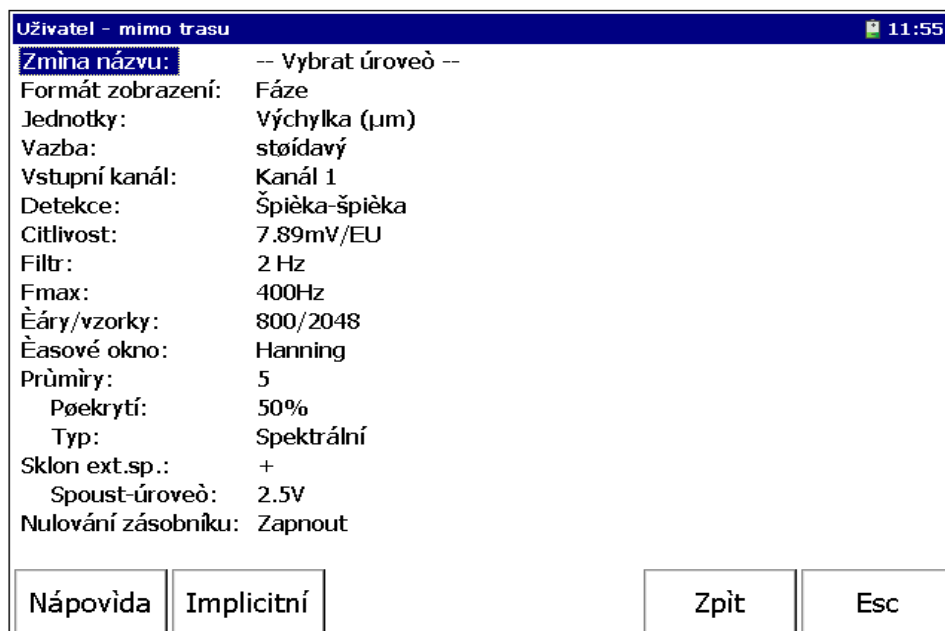
Obr. 46 TG5, 110 MW, H2-X - FFT spektrum relativních vibrací



Obr. 47 TG5, 110 MW, H2-Y - FFT spektrum relativních vibrací

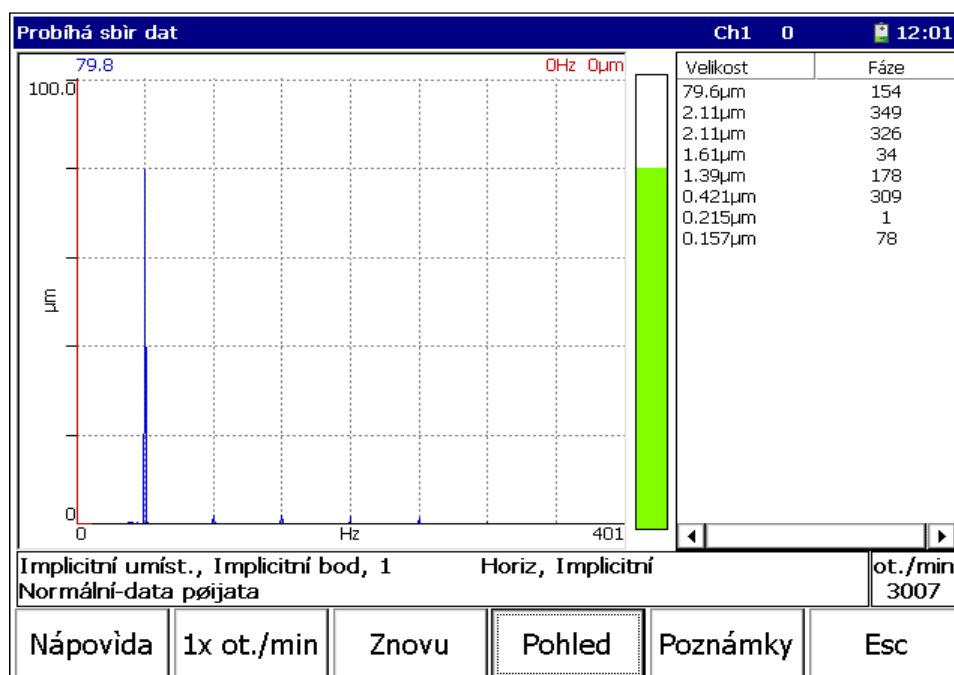
5.2.4 ODEČET AMPLITUDY A FÁZE

Amplitudy a fáze otáčkové složky získáme pomocí analyzátoru CMXA 80. Nastavení tohoto přístroje pro měření je zobrazeno na obr. 48.



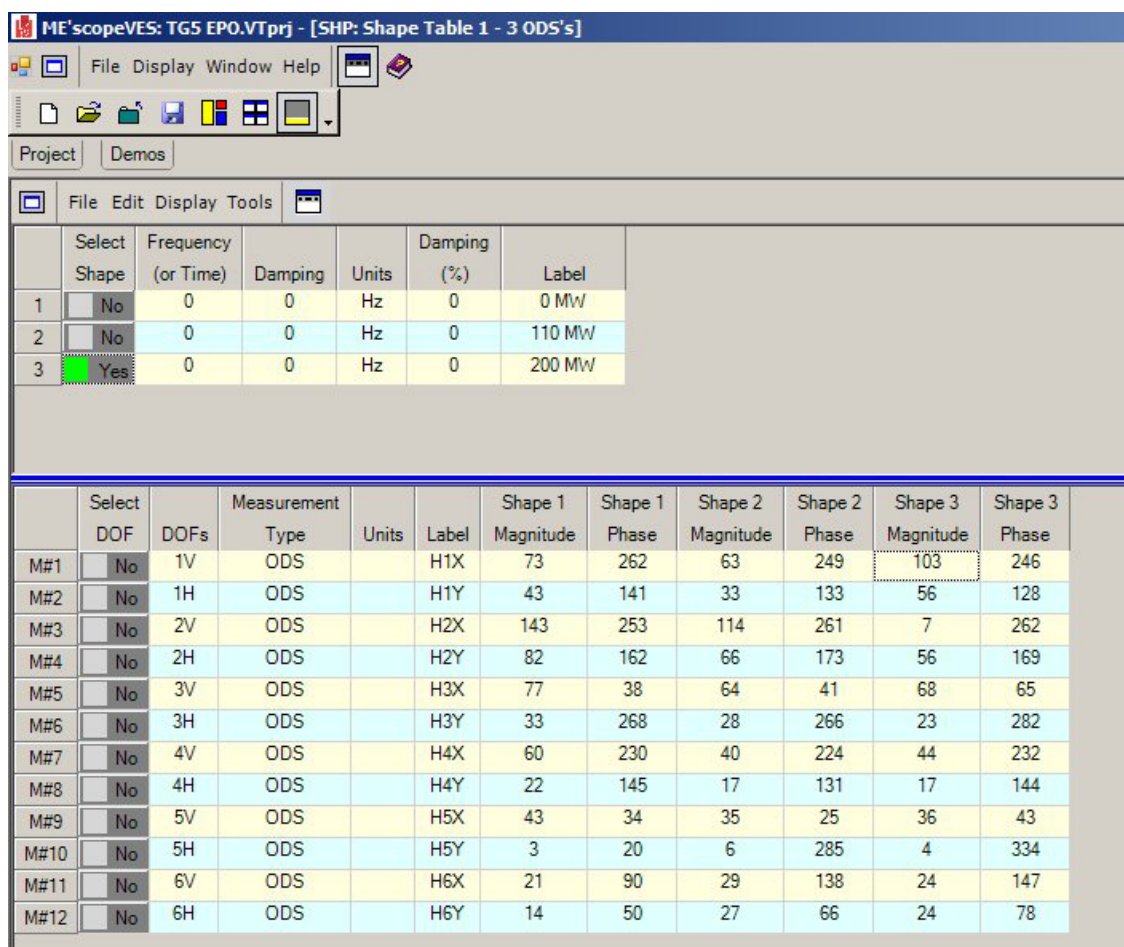
Obr. 48 Zobrazení nastavení analyzátoru CMXA 80

Pracovní plocha analyzátoru (Obr. 49) pro odečtení požadovaných hodnot.



Obr. 49 Pracovní plocha analyzátoru CMXA 80

Takto získaná data pro jednotlivá měřená místa a jednotlivé režimy, byla zadána do programu (Obr. 50) pro PTK (ME'scopeVES).



The screenshot shows the ME'scopeVES software interface. The title bar reads "ME'scopeVES: TG5 EPO.VTprj - [SHP: Shape Table 1 - 3 ODS's]". The menu bar includes "File", "Display", "Window", and "Help". Below the menu bar is a toolbar with icons for file operations and display settings. The main window contains two tables.

Table 1: Shape Table 1 - 3 ODS's

Select Shape	Frequency (or Time)	Damping	Units	Damping (%)	Label
1 <input type="checkbox"/> No	0	0	Hz	0	0 MW
2 <input type="checkbox"/> No	0	0	Hz	0	110 MW
3 <input checked="" type="checkbox"/> Yes	0	0	Hz	0	200 MW

Table 2: Measurement Data

Select DOF	DOFs	Measurement Type	Units	Label	Shape 1 Magnitude	Shape 1 Phase	Shape 2 Magnitude	Shape 2 Phase	Shape 3 Magnitude	Shape 3 Phase
M#1 <input type="checkbox"/> No	1V	ODS		H1X	73	262	63	249	103	246
M#2 <input type="checkbox"/> No	1H	ODS		H1Y	43	141	33	133	56	128
M#3 <input type="checkbox"/> No	2V	ODS		H2X	143	253	114	261	7	262
M#4 <input type="checkbox"/> No	2H	ODS		H2Y	82	162	66	173	56	169
M#5 <input type="checkbox"/> No	3V	ODS		H3X	77	38	64	41	68	65
M#6 <input type="checkbox"/> No	3H	ODS		H3Y	33	268	28	266	23	282
M#7 <input type="checkbox"/> No	4V	ODS		H4X	60	230	40	224	44	232
M#8 <input type="checkbox"/> No	4H	ODS		H4Y	22	145	17	131	17	144
M#9 <input type="checkbox"/> No	5V	ODS		H5X	43	34	35	25	36	43
M#10 <input type="checkbox"/> No	5H	ODS		H5Y	3	20	6	285	4	334
M#11 <input type="checkbox"/> No	6V	ODS		H6X	21	90	29	138	24	147
M#12 <input type="checkbox"/> No	6H	ODS		H6Y	14	50	27	66	24	78

Obr. 50 Vstupní data

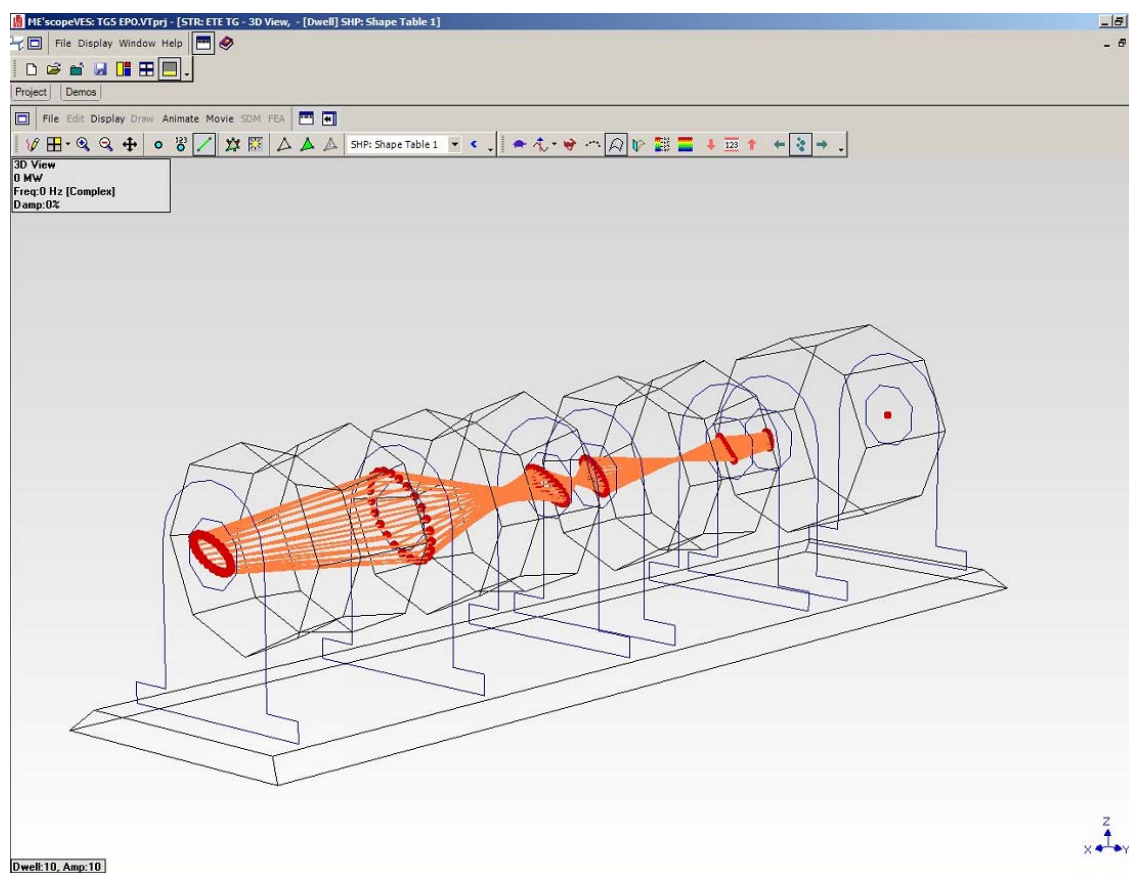
5.3 ZPRACOVÁNÍ PTK PRO JEDNOTLIVÉ REŽIMY

5.3.1 SOUSTAVA V REŽIMU 0 MW (NAPRÁZDNO)

Získané amplitudy a fáze při provozním režimu 0 MW (Tab. 1).

Bod	DOFs	Amplituda [μm]	Fáze [$^\circ$]
H1X	1V	73	262
H1Y	1H	43	141
H2X	2V	143	253
H2Y	2H	82	162
H3X	3V	77	38
H3Y	3H	33	268
H4X	4V	60	230
H4Y	4H	22	145
H5X	5V	43	34
H5Y	5H	3	20
H6X	6V	21	90
H6Y	6H	14	50

Tab. 1 Vstupní data pro analýzu režimu 0 MW



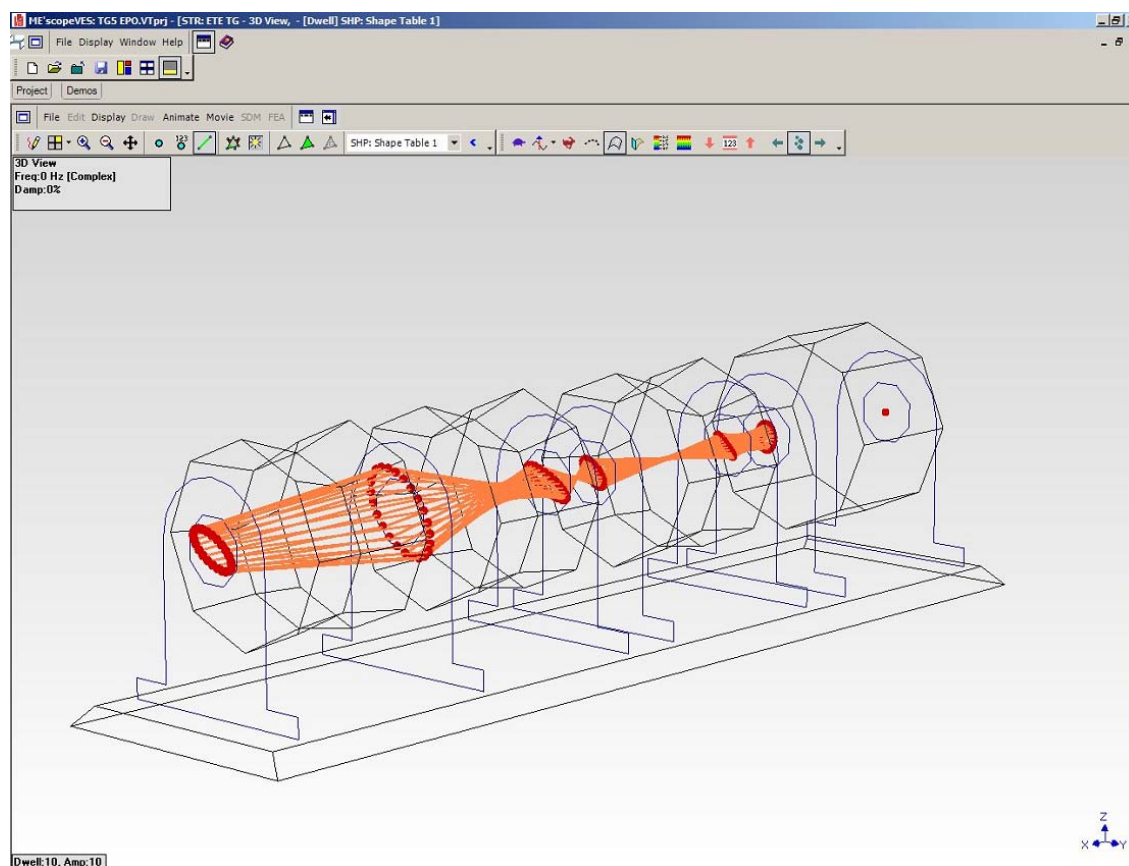
Obr. 51 PTK rotorů turbíny v režimu 0 MW

5.3.2 SOUSTAVA V REŽIMU 110 MW

Získané amplitudy a fáze při provozním režimu 110 MW (Tab. 2).

Bod	DOFs	Amplituda [μm]	Fáze [$^\circ$]
H1X	1V	63	249
H1Y	1H	33	133
H2X	2V	114	261
H2Y	2H	66	173
H3X	3V	64	41
H3Y	3H	28	266
H4X	4V	40	224
H4Y	4H	17	131
H5X	5V	35	25
H5Y	5H	6	285
H6X	6V	29	138
H6Y	6H	27	66

Tab. 2 Vstupní data pro analýzu režimu 110 MW



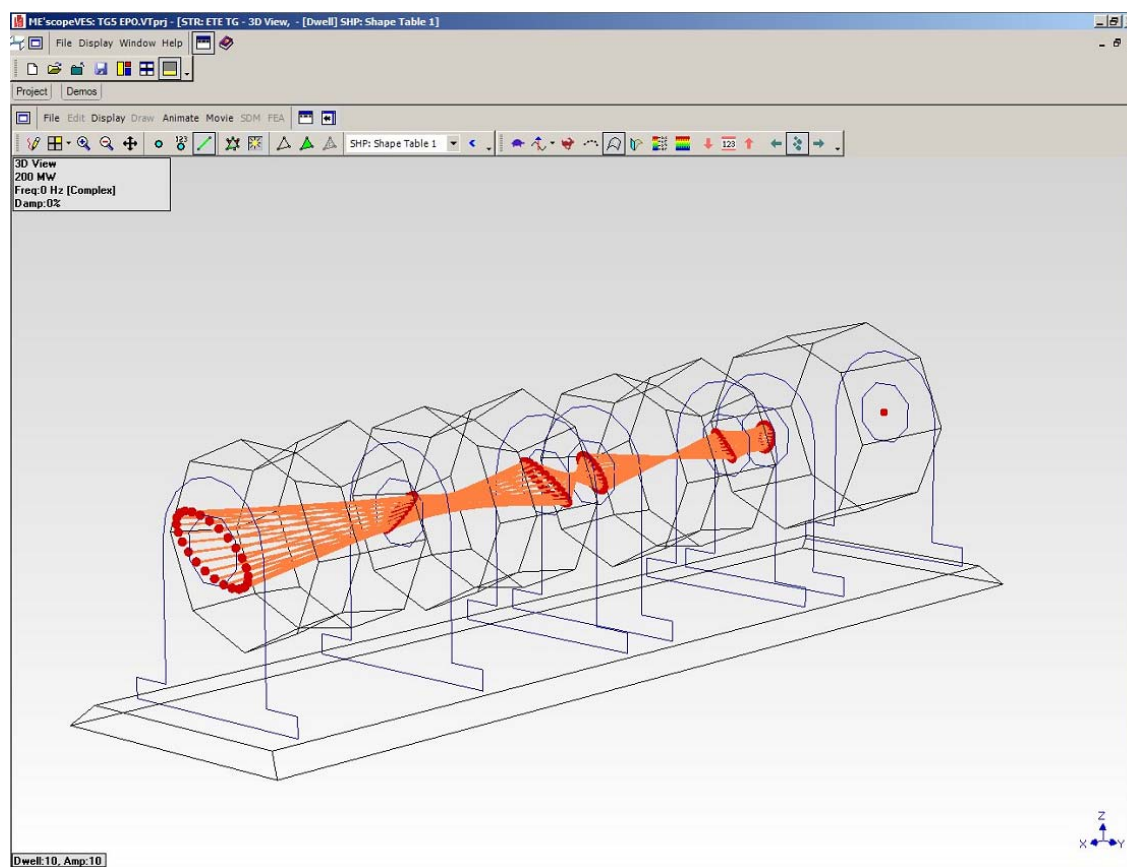
Obr. 52 PTK rotorů turbíny v režimu 110 MW

5.3.3 SOUSTAVA V REŽIMU 200 MW

Získané amplitudy a fáze při provozním režimu 200 MW (Tab. 3).

Bod	DOFs	Amplituda [μm]	Fáze [$^\circ$]
H1X	1V	103	246
H1Y	1H	56	128
H2X	2V	107	262
H2Y	2H	56	169
H3X	3V	68	65
H3Y	3H	23	282
H4X	4V	44	232
H4Y	4H	17	144
H5X	5V	36	43
H5Y	5H	4	334
H6X	6V	24	147
H6Y	6H	24	78

Tab. 3 Vstupní data pro analýzu režimu 200 MW



Obr. 53 PTK rotorů turbíny v režimu 200 MW

5.4 VYHODNOCENÍ ANALÝZY

1) CHOVÁNÍ SOUSTAVY V REŽIMU 0 MW (NAPRÁZDNO)

- nejvyšší úroveň vibrací je zjištěna na předním ložisku ST
- kmitání přes spojku VT – ST se dá konstatovat, že je ve fázi
- přes spojku ST – NT je kmitání více méně v protifázi (rozdíl fáze X je 192° , rozdíl fáze Y je 123°)
- kmitání přes spojku NT – GEN je rovněž ve fázi, přičemž vibrace jsou velmi nízké

2) CHOVÁNÍ SOUSTAVY V REŽIMU 110 MW

- nejvyšší úroveň vibrací je rovněž na předním ložisku ST
- úrovně vibrací VT – ST – NT dílů jsou o něco nižší než při režimu. Naproti tomu vibrace na GEN mírně vzrostly
- kmitání přes spojku VT – ST je v podstatě taktéž ve fázi jako v režimu 0 MW
- kmitání přes spojku ST – NT je v protifázi (rozdíl fáze X je 183° , rozdíl fáze Y je 135°)
- kmitání přes spojku NT – GEN je rovněž ve fázi
- charakter kmitů je v podstatě obdobný jako u režimu 0 MW

3) CHOVÁNÍ SOUSTAVY V REŽIMU 200 MW

- nejvyšší úroveň vibrací se přesunula na přední ložisko VT
- kmitání přes spojku VT – ST se dá konstatovat, že je jako u předchozích režimů ve fázi
- kmitání přes spojku ST – NT je taktéž v protifázi (rozdíl fáze X je 167° , rozdíl fáze Y je 138°)
- kmitání přes spojku NT – GEN je rovněž ve fázi

5.5 VÝSLEDKY ANALÝZY

Chování rotační soustavy se výrazně neliší pro režimy 0 MW a 110 MW. V případě režimu 200 MW došlo k přesunu nejvyšších hodnot úrovní vibrací na přední ložisko VT dílu. Což může souviset se skutečností, že VT díl turbíny je nejmenší a zároveň také nejlehčí, a tím pádem se zde vibrace nejvíce projeví.

Ve všech režimech se však ukazuje, že spojka mezi ST a VT kmitá v protifázi. S ohledem na výsledky, je možné provozovateli navrhnout korekci ustavení spojky mezi ST a NT dílem stroje.

Pro případ nutnosti další analýzy, je model nachystán na to, aby se dalo podrobněji vyhodnotit i kmitání a chování stroje z hlediska absolutních vibrací, tj. kmitání ložiskových stojanů a jejich upevnění k základům.

6 ZÁVĚR

Tématem diplomové práce bylo využití provozních tvarů kmitu v diagnostice. Danou problematiku řeší metoda zviditelnění provozních tvarů kmitu. Lze říci, že metoda zviditelnění provozních tvarů kmitu pomáhá odhalit zdroj zvýšených vibrací a slabá místa v konstrukci, a je účelně využívána zejména při řešení provozních potíží u rotačních strojů.

Na řešených případech bylo pomocí programů pro animaci vidět, kde se nachází slabé místo konstrukce, zejména v případě stojanu turbogenerátoru. V tomto případě se pomocí této metody určila, jako příčina vibrací, špatně odvedená práce při ukotvení stojanu k základům. Také ukazuje na to, jak je důležité neopomíjet u měřených objektů zahrnutí základové desky. Potíže se také můžou vyskytnout při vypuštění na první pohled nevýznamných směrů a nevhodně zvoleném modelu.

Ke správnému využití metody zviditelnění provozních tvarů kmitu je bezpochyby třeba mít kvalifikovaný personál, který se problematikou zabývá. Pak je tato metoda využitelná ve velkém rozsahu provozních problémů rotačních strojů, a je velkým přínosem pro technickou diagnostiku.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HELEBRANT, F., ZIEGLER, J.: *Technická diagnostika a spolehlivost II. Vibrodiagnostika*, Skripta VŠB-TUO 2005, 178 s. ISBN 80-248-0650-9.
- [2] TŮMA, J.: *Zpracování signálů získaných mechanických systémů užitím FFT*. Vydalo nakladatelství Sdělovací technika s.r.o. Praha, 1997. 174 s. ISBN 80-901936-1-7.
- [3] DOSSING, O.: *Structural stroboscopy – Measurement of Operational Deflection Shapes, Sound and vibration*, August 1988.
- [4] BILOŠ, J.: Autoreferát doktorské disertační práce – *Metoda zviditelnění provozních tvarů kmitu*. Liberec 1993.
- [5] MILÁČEK, S.: *Měření a vyhodnocování mechanických veličin*. Vydavatelství ČVUT v Praze, Praha 2001, 231s., ISBN 80-01-02417-2.
- [6] MILÁČEK, S.: *Modální analýza mechanických kmitů*. Vydavatelství ČVUT v Praze, Praha 1995.
- [7] *Vibrodiagnostika*. [online]. 2009 [2009-05-02].
WWW: < http://www.atpjournals.sk/casopisy/atp_05/pdf/atp-2005-05-28.pdf>
- [8] *Vibrační diagnostika ESOS*. [online]. 2009 [2009-10-04].
WWW: < <http://www.diagnostikastroju.cz/pdf/aplikacni-list-vibrodiagnostika.pdf>>
- [9] *Provozní tvary kmitů EKOSOFT*. [online]. 2009 [2009-05-04].
WWW: < <http://www.c-mail.cz/ekosoft/ptk.htm>>
- [10] *Vibrodiagnostika*. [online]. 2009 [2009-18-04].
WWW:<http://www.cdm.cas.cz/czech/hora/vyuka/tdk/sem2006/VD_JANDOVA.ppt>
- [11] *Experimentální metody*. [online]. 2009 [2009-19-04].
WWW:<http://www.337.vsb.cz/materialy/experimentalni_modalni_analyza/PR_3.pdf>
- [12] *Experimentální metody*. [online]. 2009 [2009-03-05].
WWW:< <http://www.dakel.cz/index.php?pg=prod/sens/mdk13>>
- [13] *Vibrační diagnostika*. [online]. 2009 [2009-08-05].
WWW:<http://www.337.vsb.cz/materialy/vibracni_diagnostika/VIBDI_1.pdf>

[14] *Vibrační diagnostika*. [online]. 2009 [2009-08-05].

WWW:<http://www.337.vsb.cz/materialy/vibracni_diagnostika/VIBDI_3_str1az24.pdf>

[15] *Vibrační diagnostika*. [online]. 2009 [2009-08-05].

WWW:<http://www.337.vsb.cz/materialy/vibracni_diagnostika/VIBDI_2.pdf>

PŘÍLOHY

Příloha 1 CD - ROM

Příloha 2 Tabulka struktury bodů modelu turbíny TG5

ME'scope Spreadsheet Structure					
Point	Label	X Coord.	Y Coord.	Z Coord.	Center Pt.
Point#1	5	0,00	0,02	0,49	2
Point#2		-4,00	0,21	0,95	1
Point#3	6	-1,00	0,00	0,49	0
Point#4	7	-4,00	0,00	0,49	0
Point#5	4	3,00	0,02	0,49	2
Point#6	3	4,00	0,01	0,49	2
Point#7	2	7,00	0,02	0,49	0
Point#8		-4,25	-1,77	-1,82	0
Point#9		-4,01	-1,75	-1,82	0
Point#10		-4,01	1,78	-1,82	0
Point#11		-4,25	1,77	-1,82	0
Point#12		-4,50	2,06	-2,12	0
Point#13		-4,01	2,08	-2,12	0
Point#14		-4,01	2,06	-2,12	0
Point#15		-4,01	-1,77	-1,82	0
Point#16		-4,01	-2,04	-2,12	0
Point#17		-4,50	-2,06	-2,12	0
Point#18		-4,01	1,77	-1,82	0
Point#19		8,96	0,02	0,48	19
Point#20		8,96	-0,85	1,25	19
Point#21		8,96	0,02	1,61	19
Point#22		8,96	0,88	1,25	19
Point#23		8,96	1,24	0,38	19
Point#24		8,96	0,88	-0,48	19
Point#25		8,96	0,02	-0,84	19
Point#26		8,96	-0,85	-0,48	19
Point#27		8,96	-1,20	0,38	19
Point#28		7,96	0,02	0,48	28
Point#29		7,96	0,02	1,93	28
Point#30		7,96	1,05	1,50	28
Point#31		7,96	1,48	0,46	28
Point#32		7,96	1,05	-0,57	28
Point#33		7,96	0,02	-1,00	28
Point#34		7,96	-1,02	-0,57	28
Point#35		7,96	-1,44	0,46	28

Point#36		7,96	-1,02	1,50	28
Point#37		8,96	0,02	0,48	37
Point#38		8,96	0,02	1,61	37
Point#39		8,96	0,88	1,25	37
Point#40		8,96	1,24	0,38	37
Point#41		8,96	0,88	-0,48	37
Point#42		8,96	0,02	-0,84	37
Point#43		8,96	-0,85	-0,48	37
Point#44		8,96	-1,20	0,38	37
Point#45		8,96	-0,85	1,25	37
Point#46		6,50	0,01	0,48	46
Point#47		6,50	0,02	1,93	46
Point#48		6,50	-1,02	1,50	46
Point#49		6,50	-1,44	0,46	46
Point#50		6,50	-1,02	-0,58	46
Point#51		6,50	0,02	-1,00	46
Point#52		6,50	1,05	-0,58	46
Point#53		6,50	1,48	0,46	46
Point#54		6,50	1,05	1,50	46
Point#55		0,55	0,02	0,48	55
Point#56		0,55	0,02	1,91	55
Point#57		0,55	1,05	1,50	55
Point#58		0,55	1,48	0,46	55
Point#59		0,55	1,05	-0,57	55
Point#60		0,55	0,02	-1,00	55
Point#61		0,55	-1,02	-0,57	55
Point#62		0,55	-1,44	0,46	55
Point#63		0,55	-1,02	1,50	55
Point#64		5,50	0,01	0,48	64
Point#65		5,50	0,02	1,61	64
Point#66		5,50	0,88	1,25	64
Point#67		5,50	1,24	0,39	64
Point#68		5,50	0,88	-0,48	64
Point#69		5,50	0,02	-0,84	64
Point#70		5,50	-0,85	-0,48	64
Point#71		5,50	-1,20	0,39	64
Point#72		5,50	-0,85	1,25	64
Point#73		10,50	0,02	0,48	73
Point#74		1,55	0,02	1,61	73
Point#75		1,55	-0,85	1,25	73
Point#76		1,55	-1,20	0,38	73
Point#77		1,55	-0,85	-0,48	73
Point#78		1,55	0,02	-0,84	73
Point#79		1,55	0,88	-0,48	73
Point#80		1,55	1,24	0,38	73
Point#81		1,55	0,88	1,25	73

Point#82		3,71	2,08	-2,12	0
Point#83		-0,48	2,08	-2,12	0
Point#84		3,90	-2,04	-2,12	0
Point#85		-0,48	-2,04	-2,12	0
Point#86		3,71	1,78	-1,82	0
Point#87		-0,48	1,78	-1,82	0
Point#88		3,71	-1,75	-1,82	0
Point#89		-0,48	-1,75	-1,82	0
Point#90		2,55	0,02	0,48	90
Point#91		2,55	-1,02	-0,57	90
Point#92		2,55	0,02	-1,00	90
Point#93		2,55	1,05	-0,57	90
Point#94		2,55	1,48	0,46	90
Point#95		2,55	1,05	1,50	90
Point#96		2,51	0,02	1,91	90
Point#97		2,55	-1,02	1,50	90
Point#98		2,55	-1,44	0,46	90
Point#99		-4,00	0,48	0,68	1
Point#100		-4,00	0,48	0,30	1
Point#101		-4,00	0,21	0,03	1
Point#102		-4,00	-0,18	0,03	1
Point#103		-4,00	-0,45	0,30	1
Point#104		-4,00	-0,45	0,68	1
Point#105		-4,00	-0,18	0,95	1
Point#106		-4,00	0,72	1,20	1
Point#107		-4,00	0,40	1,41	1
Point#108		-4,00	1,02	0,49	1
Point#109		-4,00	0,94	0,87	1
Point#110		-4,00	1,02	-1,51	1
Point#111		-4,00	-0,98	-1,51	1
Point#112		-4,00	-0,98	0,49	1
Point#113		-4,00	-0,69	1,20	1
Point#114		-4,00	-0,91	0,87	1
Point#115		-4,00	0,02	1,49	1
Point#116		-4,00	-0,37	1,41	1
Point#117		-4,00	-1,58	-1,51	0
Point#118		-4,00	-1,58	-1,81	0
Point#119		-4,00	0,02	-1,81	0
Point#120		-4,00	1,62	-1,81	0
Point#121		-4,00	1,62	-1,51	0
Point#122		-0,05	0,21	0,95	5
Point#123		-0,05	0,48	0,68	5
Point#124		-0,05	0,48	0,30	5
Point#125		-0,05	0,21	0,03	5
Point#126		-0,05	-0,18	0,03	5
Point#127		-0,05	-0,45	0,30	5

Point#128		-0,05	-0,45	0,68	5
Point#129		-0,05	-0,18	0,95	5
Point#130		-0,05	0,72	1,20	5
Point#131		-0,05	0,40	1,41	5
Point#132		-0,05	1,02	0,49	5
Point#133		-0,05	0,94	0,87	5
Point#134		-0,05	1,02	-1,51	5
Point#135		-0,05	-0,98	-1,51	5
Point#136		-0,05	-0,98	0,49	5
Point#137		-0,05	-0,69	1,20	5
Point#138		-0,05	-0,91	0,87	5
Point#139		-0,05	0,02	1,49	5
Point#140		-0,05	-0,37	1,41	5
Point#141		-0,05	-1,58	-1,51	0
Point#142		-0,05	-1,58	-1,81	0
Point#143		-0,05	0,02	-1,81	0
Point#144		-0,05	1,62	-1,81	0
Point#145		-0,05	1,62	-1,51	0
Point#146		4,00	0,20	0,95	6
Point#147		4,00	0,48	0,68	6
Point#148		4,00	0,48	0,30	6
Point#149		4,00	0,20	0,03	6
Point#150		4,00	-0,18	0,03	6
Point#151		4,00	-0,45	0,30	6
Point#152		4,00	-0,45	0,68	6
Point#153		4,00	-0,18	0,95	6
Point#154		4,00	0,72	1,20	6
Point#155		4,00	0,40	1,41	6
Point#156		4,00	1,01	0,49	6
Point#157		4,00	0,94	0,87	6
Point#158		4,00	1,01	-1,51	6
Point#159		4,00	-0,99	-1,51	6
Point#160		4,00	-0,99	0,49	6
Point#161		4,00	-0,69	1,20	6
Point#162		4,00	-0,91	0,87	6
Point#163		4,00	0,01	1,49	6
Point#164		4,00	-0,37	1,41	6
Point#165		4,00	-1,59	-1,51	0
Point#166		4,00	-1,59	-1,81	0
Point#167		4,00	0,01	-1,81	0
Point#168		4,00	1,61	-1,81	0
Point#169		4,00	1,61	-1,51	0
Point#170		3,00	0,19	0,95	4
Point#171		3,00	0,46	0,68	4
Point#172		3,00	0,46	0,30	4
Point#173		3,00	0,19	0,03	4

Point#174		3,00	-0,19	0,03	4
Point#175		3,00	-0,47	0,30	4
Point#176		3,00	-0,47	0,68	4
Point#177		3,00	-0,19	0,95	4
Point#178		3,00	0,70	1,20	4
Point#179		3,00	0,38	1,41	4
Point#180		3,00	1,00	0,49	4
Point#181		3,00	0,92	0,87	4
Point#182		3,00	1,00	-1,51	4
Point#183		3,00	-1,00	-1,51	4
Point#184		3,00	-1,00	0,49	4
Point#185		3,00	-0,71	1,20	4
Point#186		3,00	-0,93	0,87	4
Point#187		3,00	0,00	1,49	4
Point#188		3,00	-0,39	1,41	4
Point#189		3,00	-1,60	-1,51	0
Point#190		3,00	-1,60	-1,81	0
Point#191		3,00	0,00	-1,81	0
Point#192		3,00	1,60	-1,81	0
Point#193		3,00	1,60	-1,51	0
Point#194		-1,00	0,19	0,95	3
Point#195		-1,00	0,46	0,68	3
Point#196		-1,00	0,46	0,30	3
Point#197		-1,00	0,19	0,03	3
Point#198		-1,00	-0,19	0,03	3
Point#199		-1,00	-0,47	0,30	3
Point#200		-1,00	-0,47	0,68	3
Point#201		-1,00	-0,19	0,95	3
Point#202		-1,00	0,70	1,20	3
Point#203		-1,00	0,38	1,41	3
Point#204		-1,00	1,00	0,49	3
Point#205		-1,00	0,92	0,87	3
Point#206		-1,00	1,00	-1,51	3
Point#207		-1,00	-1,00	-1,51	3
Point#208		-1,00	-1,00	0,49	3
Point#209		-1,00	-0,71	1,20	3
Point#210		-1,00	-0,93	0,87	3
Point#211		-1,00	0,00	1,49	3
Point#212		-1,00	-0,39	1,41	3
Point#213		-1,00	-1,60	-1,51	0
Point#214		-1,00	-1,60	-1,81	0
Point#215		-1,00	0,00	-1,81	0
Point#216		-1,00	1,60	-1,81	0
Point#217		-1,00	1,60	-1,51	0
Point#218		-1,50	0,00	0,48	218
Point#219		-1,50	-1,07	-0,60	218

Point#220		-1,50	0,00	-1,04	218
Point#221		-1,50	1,08	-0,60	218
Point#222		-1,50	1,53	0,48	218
Point#223		-1,50	1,08	1,56	218
Point#224		-1,50	-1,07	1,56	218
Point#225		-1,50	-1,52	0,48	218
Point#226		-3,50	0,00	0,48	226
Point#227		-3,50	-1,07	-0,60	226
Point#228		-3,50	0,00	-1,04	226
Point#229		-3,50	1,08	-0,60	226
Point#230		-3,50	1,53	0,48	226
Point#231		-3,50	1,08	1,56	226
Point#232		-3,50	0,00	2,01	226
Point#233		-3,50	-1,07	1,56	226
Point#234		-3,50	-1,52	0,48	226
Point#235		-4,01	-2,06	-2,12	0
Point#236		3,71	2,08	-2,12	0
Point#237		11,31	2,08	-2,12	0
Point#238		6,93	2,08	-2,12	0
Point#239		11,31	-2,04	-2,12	0
Point#240		3,91	-2,04	-2,12	0
Point#241		6,93	-2,04	-2,12	0
Point#242		3,71	1,78	-1,82	0
Point#243		11,12	1,78	-1,82	0
Point#244		6,93	1,78	-1,82	0
Point#245		11,12	-1,75	-1,82	0
Point#246		3,71	-1,75	-1,82	0
Point#247		6,93	-1,75	-1,82	0
Point#248		9,96	0,02	0,48	248
Point#249		9,96	-1,02	-0,57	248
Point#250		9,96	0,02	-1,00	248
Point#251		9,96	1,05	-0,57	248
Point#252		9,96	1,48	0,46	248
Point#253		9,96	1,05	1,50	248
Point#254		9,96	0,02	1,93	248
Point#255		9,96	-1,02	1,50	248
Point#256		9,96	-1,44	0,46	248
Point#257		4,50	0,01	0,48	257
Point#258		4,50	-1,02	-0,58	257
Point#259		4,50	0,02	-1,00	257
Point#260		4,50	1,05	-0,58	257
Point#261		4,50	1,48	0,46	257
Point#262		4,50	1,05	1,50	257
Point#263		4,50	0,02	1,93	257
Point#264		4,50	-1,02	1,50	257
Point#265		4,50	-1,44	0,46	257

Point#266	1	10,50	0,00	0,50	0
Point#267		7,00	0,21	0,95	7
Point#268		7,00	0,48	0,68	7
Point#269		7,00	0,48	0,30	7
Point#270		7,00	0,21	0,03	7
Point#271		7,00	-0,18	0,03	7
Point#272		7,00	-0,45	0,30	7
Point#273		7,00	-0,45	0,68	7
Point#274		7,00	-0,18	0,95	7
Point#275		7,00	0,72	1,20	7
Point#276		7,00	0,40	1,41	7
Point#277		7,00	1,02	0,49	7
Point#278		7,00	0,94	0,87	7
Point#279		7,00	1,02	-1,51	7
Point#280		7,00	-0,98	-1,51	7
Point#281		7,00	-0,98	0,49	7
Point#282		7,00	-0,69	1,20	7
Point#283		7,00	-0,91	0,87	7
Point#284		7,00	0,02	1,49	7
Point#285		7,00	-0,37	1,41	7
Point#286		7,00	-1,58	-1,51	0
Point#287		7,00	-1,58	-1,81	0
Point#288		7,00	0,02	-1,81	0
Point#289		7,00	1,62	-1,81	0
Point#290		7,00	1,62	-1,51	0
Point#291		10,50	0,20	0,95	266
Point#292		10,50	0,48	0,68	266
Point#293		10,50	0,48	0,30	266
Point#294		10,50	0,20	0,03	266
Point#295		10,50	-0,18	0,03	266
Point#296		10,50	-0,45	0,30	266
Point#297		10,50	-0,45	0,68	266
Point#298		10,50	-0,18	0,95	266
Point#299		10,50	0,72	1,20	266
Point#300		10,50	0,40	1,41	266
Point#301		10,50	1,01	0,49	266
Point#302		10,50	0,94	0,87	266
Point#303		10,50	1,01	-1,51	266
Point#304		10,50	-0,99	-1,51	266
Point#305		10,50	-0,99	0,49	266
Point#306		10,50	-0,69	1,20	266
Point#307		10,50	-0,91	0,87	266
Point#308		10,50	0,01	1,49	266
Point#309		10,50	-0,37	1,41	266
Point#310		10,50	-1,59	-1,51	0
Point#311		10,50	-1,59	-1,81	0

Point#312		10,50	0,01	-1,81	0
Point#313		10,50	1,61	-1,81	0
Point#314		10,50	1,61	-1,51	0
Point#315		-1,50	0,00	2,01	0